

**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA**  
**SEDE QUITO**

**CARRERA:**  
**INGENIERÍA MECÁNICA**

**Trabajo de titulación previo a la obtención del título de:**  
**INGENIERO MECÁNICO**

**TEMA:**  
**EVALUACIÓN DE LA RESISTENCIA A LA FLEXIÓN Y TORSIÓN DEL**  
**MATERIAL ÁCIDO POLILÁCTICO (PLA) MANUFACTURADO POR**  
**IMPRESIÓN 3D CON PATRÓN DE PANAL DE ABEJA Y PORCENTAJE**  
**DE RELLENO DEL 50%**

**AUTOR:**  
**ECHEVERRÍA ALDANA EDDY ANDRES**

**TUTORA:**  
**MORENO DIAGO NANCY VERÓNICA**

**Quito, agosto del 2021**

## CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR

Yo, Eddy Andrés Echeverría Aldana, con cédula de ciudadanía N° 1726918079, manifiesto mi voluntad y cedo a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que soy autor del trabajo de titulación intitulado: **EVALUACIÓN DE LA RESISTENCIA A LA FLEXIÓN Y TORSIÓN DEL MATERIAL ÁCIDO POLILÁCTICO (PLA) MANUFACTURADO POR IMPRESIÓN 3D CON PATRÓN DE PANAL DE ABEJA Y PORCENTAJE DE RELLENO DEL 50%**, mismo que ha sido desarrollado para optar por el título de Ingeniero Mecánico, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En aplicación a lo determinado en la Ley de Propiedad Intelectual, en condición de autor me reservo los derechos morales de la obra antes citada. En concordancia, suscribo este documento en el momento que hago entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.



Eddy Andrés Echeverría Aldana

C.I.: 1726918079

**Quito, agosto del 2021**

## DECLARATORIA DE COAUTORÍA DEL DOCENTE TUTOR

Yo, declaro que bajo mi dirección y asesoría fue desarrollado el trabajo de titulación: **EVALUACIÓN DE LA RESISTENCIA A LA FLEXIÓN Y TORSIÓN DEL MATERIAL ÁCIDO POLILÁCTICO (PLA) MANUFACTURADO POR IMPRESIÓN 3D CON PATRÓN DE PANAL DE ABEJA Y PORCENTAJE DE RELLENO DEL 50%**, realizado por Eddy Andrés Echeverría Aldana, obteniendo un producto que cumple con todos los requisitos estipulados por la Universidad Politécnica Salesiana para ser considerado como trabajo final de titulación.

Quito, agosto del 2021



Nancy Verónica Moreno Diago

C.I.: 1758355307

## **DEDICATORIA**

Dedico el presente trabajo a Dios, que gracias a sus bendiciones me ha permitido culminar satisfactoriamente cada etapa de mi vida.

A mi familia, quienes me han apoyado en todo momento y con cada decisión que he tomado a lo largo de mi trayecto.

**Eddy Echeverría**

## **AGRADECIMIENTO**

Mi agradecimiento a la Universidad Politécnica Salesiana, y a la carrera de Ingeniería Mecánica por brindarme un conocimiento integral, una actitud y una guía de habilidades a la vanguardia de las necesidades del país, así como una formación personal y espiritual para la vocación con la comunidad.

**Eddy Echeverría**

## ÍNDICE GENERAL

CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR.....	i
DECLARATORIA DE COAUTORÍA DEL DOCENTE TUTOR.....	ii
DEDICATORIA .....	iii
AGRADECIMIENTO .....	iv
ÍNDICE GENERAL.....	v
ÍNDICE TABLAS.....	x
ÍNDICE FIGURAS .....	xii
RESUMEN.....	xv
ABSTRACT.....	xvi
INTRODUCCIÓN .....	xvii
ANTECEDENTES.....	1
CAPÍTULO I.....	3
MARCO TEÓRICO.....	3
1.1 Historia.....	3
1.2 Propiedades Fisicoquímicas del material .....	4
1.2.1 Ácido poli-láctico (PLA).....	5
1.2.2 Estructura del PLA .....	6
1.2.3 Propiedades térmicas y mecánicas del PLA.....	6
1.3 Tipos de materiales producidos en base a la creación de objetos 3d .....	8
1.4 Ensayos de sometimiento al filamento PLA .....	9
1.4.1 Ensayo de tracción al filamento PLA.....	9
1.4.2 Ensayo de flexión al filamento PLA .....	10
1.4.3 Ensayo de torsión al filamento PLA.....	12
1.5 Tecnologías para el procesamiento en la impresión 3d .....	15
1.5.1 Técnicas de Fabricación Aditivas.....	16

1.5.2 Dispositivos para el procesamiento en la impresión 3d .....	18
1.5.3 Análisis costo beneficio para la introducción de la tecnología en la industria ecuatoriana.....	19
1.5.4 Aplicaciones mecánicas en elementos manufacturados por impresión 3d “en base al sometimiento de los esfuerzos flexión torsión o combinación de ambos”	20
CAPÍTULO II .....	21
DESARROLLO EXPERIMENTAL.....	21
2.1 Información técnica de los equipos encargados del proceso de impresión “software y maquinaria”. .....	21
2.2 Metodología para el estudio experimental para la obtención de los resultados requeridos.....	22
2.2.1 Análisis termo gravimétrico .....	22
2.2.2 Ensayos mecánicos.....	22
2.3 Establecimiento de las normas apropiadas para el ensayo de flexión y torsión al cual se someterá el material .....	23
2.4 Estudio de los parámetros apropiados para el proceso de impresión.....	23
2.4.1 Espesor Capa .....	24
2.4.2 Velocidad de impresión.....	24
2.4.3 Densidad de relleno .....	25
2.4.4 Patrón de relleno.....	26
2.4.4.1 Tipos de patrón de relleno .....	27
2.4.5 Temperatura de impresión.....	29
2.4.6 Orientación del modelo .....	29
CAPÍTULO III.....	31
ANÁLISIS DE RESULTADOS EXPERIMENTALES .....	31
3.1 Análisis de las normas bajo las cuales se someten los distintos tipos de ensayos mecánicos.....	31
3.2 Obtención de datos para el estudio estadístico.....	35

3.3 Procedimiento para la realización de ensayos mecánicos.....	36
3.3.1 Esquematización para la realización de ensayo a flexión .....	36
3.3.2 Esquematización para la realización de ensayo a torsión.....	36
3.4 Análisis y descripción del comportamiento de los elementos sometidos a las cargas.....	37
CAPÍTULO IV .....	39
RESULTADOS ENSAYOS .....	39
4.1 Maquinaria encargada de realizar los ensayos de flexión y torsión.....	39
4.1.1 Ensayo Flexión .....	39
4.1.2 Ensayo Torsión.....	40
4.2 Diseño mecánico probeta dimensional y características .....	41
4.3.1 Pasos para la impresión en base al software.....	43
4.4 Estudio de las propiedades del material proporcionado y del diseño generado en CAD .....	44
4.5 Resultados del ensayo de flexión del filamento PLA .....	47
4.6 Ensayo de torsión en estado de suministro .....	53
4.7 Procedimiento ensayo torsión .....	53
4.8 Resultados del ensayo de torsión del filamento PLA .....	54
4.8.1 Mallado panel de abeja a 45° con relleno del 50%.....	54
4.9 Resolución de simulación .....	59
4.10 Método de elementos finitos para estudio estático .....	60
4.10.1 Creación de la geometría de los elementos a simular bajo diferentes condiciones. ....	60
4.10.2 Caracterización del Mallado.....	62
4.10.3 Simulación ensayo de flexión.....	63
4.10.4 Simulación ensayo de torsión.....	64
4.11 Resultados de la simulación .....	65
CAPÍTULO V .....	69



ANÁLISIS ESTADÍSTICO.....	69
5.1 Descripción de métodos estadísticos.....	69
5.1.1 Desviación Estándar Típica.....	69
5.1.2 Gráficos de Correlación.....	69
5.1.3 Graficas de Control .....	70
5.1.4 Patrones de Inestabilidad en un Gráfico de Control.....	71
5.2 Métodos para el estudio estadístico comparativo del ensayo.....	72
5.2.1 Método Taguchi .....	72
5.2.2 Diseño mediante arreglo ortogonal .....	73
5.2.3 Factores y niveles influyentes .....	73
5.2.4 Función objetivo.....	74
5.2.5 Método ANOVA .....	75
5.2.6 Fortalezas de enfoques estadísticos .....	76
CAPÍTULO VI.....	84
VALIDACIÓN DE RESULTADOS .....	84
6.1 Resultados obtenidos en base al ensayo.....	84
6.2 Comparativa modelo teórico y práctico .....	85
6.3 Análisis en función a la viabilidad de implementación de la tecnología respecto a otras más tradicionales .....	88
6.4 Campo y mercado que abarca la tecnología en impresión 3D y sus principales beneficios respecto a otras. ....	89
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	90
LISTA DE REFERENCIA .....	92
ANEXOS .....	96
Anexo 1. Ficha técnica de máquina TESTRESOURCES.....	96
Anexo 2. Instructivo de máquina para ensayo torsión. ....	96
Anexo 3. Plano de la probeta, ensayo de flexión. ....	97
Anexo 4. Plano de Ensayo de torsión.....	97

Anexo 5. Imágenes de ensayo de flexión.....	98
Anexo 6. Imágenes de ensayo de torsión.....	99

## ÍNDICE TABLAS

Tabla 1. Características técnicas del PLA por colores [6] .....	5
Tabla 2. Propiedades térmicas y propiedades del material PLA [8] .....	7
Tabla 3. Propiedades Mecánicas [8] .....	7
Tabla 4. Gama Impresoras empresa INNOVA 3D [21].....	19
Tabla 5. Materiales impresión 3D empresa INNOVA 3D [21] .....	20
Tabla 6. Propiedades de especímenes PLA impresos bajo varias velocidades de impresión [28] .....	25
Tabla 7. Patrones y densidades de relleno en función a la pieza. [32].....	28
Tabla 8. Temperaturas de filamentos en impresión 3d con técnica FDM [2].....	29
Tabla 9. Parámetros de configuración para Impresión 3D de probetas para ensayo .	35
Tabla 10. Parámetros de funcionamiento de máquina herramienta TESTRESOURCES Serie 315 .....	39
Tabla 11. Parámetros de funcionamiento de máquina herramienta TESTRESOURCES Serie 315 .....	41
Tabla 12. Propiedades PLA.....	42
Tabla 13. Propiedades PLA.....	42
Tabla 14. Parámetros utilizados en la fabricación de probetas de flexión .....	43
Tabla 15. Parámetros utilizados en la fabricación de probetas de torsión .....	44
Tabla 16. Parámetros software ensayo flexión .....	46
Tabla 17. Parámetros ensayo flexión .....	47
Tabla 18. Parámetros ensayo torsión .....	55
Tabla 19. Resultados de simulación ensayo flexión .....	67
Tabla 20. Resultados simulación ensayo torsión .....	68
Tabla 21. Análisis de varianza (ANOVA). .....	75
Tabla 22. Comparación diseño experimental y método Taguchi [44] .....	76
Tabla 23. Diseño análisis de datos Taguchi [44] .....	77
Tabla 24. Diseño experimental [44].....	77
Tabla 25. Análisis ANOVA flexión modelo practico y teórico factor Carga Máxima. .....	78
Tabla 26. Análisis ANOVA torsión modelo practico teórico factor Torque Máximo. .....	79

Tabla 27. Análisis ANOVA flexión modelo practico teórico factor Esfuerzo Máximo. ....	80
Tabla 28. Análisis ANOVA torsión modelo practico teórico factor Esfuerzo Cortante. ....	81
Tabla 29. Análisis ANOVA flexión modelo practico teórico factor Modulo de Elasticidad. ....	82
Tabla 30. Análisis ANOVA torsión modelo practico teórico factor Modulo de Rigidez. ....	83
Tabla 31. Análisis 1 Flexión .....	84
Tabla 32. Análisis 2 Torsión .....	84
Tabla 33. Análisis de errores Esfuerzo Máximo y Deformación Unitaria al 50 %, experimental-teórico modelo flexión. ....	85
Tabla 34. Análisis de errores Esfuerzo Cortante y Deformación Unitaria al 50 %, experimental-teórico modelo torsión. ....	86
Tabla 35. Comparación deformación unitaria al 50 %, experimental-teórico ensayo flexión .....	87
Tabla 36. Comparación deformación unitaria al 50 %, experimental-teórico ensayo torsión.....	87
Tabla 37. Análisis 5 Costos Beneficio .....	89

## ÍNDICE FIGURAS

Figura 1. Diagrama de proceso de modelación por deposición en fundido [4] .....	3
Figura 2. Estructuras químicas de los isómeros de ácido láctico. [7]. .....	6
Figura 3. Perfil Esquemático Maquina para ensayos de tracción. [13].....	9
Figura 4. Curvas típicas de esfuerzo flexión contra deformación. [2] .....	12
Figura 5. Factores de concentración de esfuerzos para filetes en ejes circulares de sección variable. [13] .....	13
Figura 6. Esquema fenómeno torsional. [16] .....	15
Figura 7. Fenómeno materiales frágiles. [16] .....	15
Figura 8. Esquema de un aparato de estereografía. [17] .....	16
Figura 9. Esquema proceso PolyJet. [19].....	17
Figura 10. Esquema proceso sinterizado laser. [18] .....	17
Figura 11. Esquema proceso modelado por deposición fundida. [20] .....	18
Figura 12. Impresora modelo Prusa i3. [17] .....	18
Figura 13. Evolución de ventas INNOVA 3D. [21].....	19
Figura 14. Fases proceso de diseño. [22] .....	21
Figura 15. Deposición por capas FDM. [27] .....	24
Figura 16. Porcentajes de relleno. [7] .....	25
Figura 17. Resistencia a la tracción vs porcentaje de relleno. [29].....	26
Figura 18. Patrones de relleno. [17] .....	26
Figura 19. Patrones de relleno software Simplify 3D. [2] .....	27
Figura 20. Variación porcentaje de relleno patrón hexagonal. [31].....	28
Figura 21. Orientación de la impresión de probetas para un ensayo mecánico de flexión. [2].....	30
Figura 22. Máquina universal de ensayos mecánicos TESTRESOURCES. [2].....	40
Figura 23. Máquina ensayo torsión Avery 6609CHG. [39].....	40
Figura 24. Dimensiones y geometría de las probetas para ensayo de flexión.....	44
Figura 25. Parámetros de ensayo de flexión. ....	46
Figura 26. Posicionamiento probeta ensayo flexión. ....	47
Figura 27. Ensayo flexión Probeta 1.....	48
Figura 28. Ensayo flexión Probeta 2.....	48
Figura 29. Ensayo flexión Probeta 3.....	49

Figura 30. Ensayo flexión Probeta 4.....	49
Figura 31. Ensayo flexión Probeta 5.....	50
Figura 32. Ensayo flexión Probeta 6.....	50
Figura 33. Ensayo flexión Probeta 7.....	51
Figura 34. Ensayo flexión Probeta 8.....	51
Figura 35. Ensayo flexión Probeta 9.....	52
Figura 36. Ensayo flexión Probetas 1-9.....	52
Figura 37. Ensayo torsión maquina Avery.....	53
Figura 38. Detalle resultado final ensayo torsión.....	55
Figura 39. Grafica Torque vs Angulo de giro probetas 50% de densidad de relleno Probeta 1. ....	56
Figura 40. Grafica Torque vs Angulo de giro probetas 50% de densidad de relleno Probeta 2. ....	56
Figura 41. Grafica Torque vs Angulo de giro probetas 50% de densidad de relleno Probeta 3. ....	57
Figura 42. Grafica Torque vs Angulo de giro probetas 50% de densidad de relleno Probeta 4. ....	57
Figura 43. Grafica Torque vs Angulo de giro probetas 50% de densidad de relleno Probeta 5. ....	58
Figura 44. Ensayo torsión probetas 1-5.....	58
Figura 45. Ensayo de flexión en software de AEF con identificación de valores para esfuerzos resultantes.....	59
Figura 46. Parámetros para la creación del material PLA de forma manual. ....	60
Figura 47. Vista exterior probeta 50% de densidad de relleno en configuración panel de abeja diseñada para ensayo a flexión. ....	61
Figura 48. Vista interior Probeta 50% de densidad de relleno en configuración panel de abeja diseñada para ensayo a flexión. ....	61
Figura 49. Vista exterior probeta 50% de densidad de relleno en configuración panel de abeja diseñada para ensayo a torsión.....	62
Figura 50. Eje mallado para estudio estructural.....	63
Figura 51. Condiciones carga.....	63
Figura 52. Eje mallado para estudio estructural.....	64
Figura 53. Eje mallado para estudio estructural.....	64
Figura 54. Eje mallado ensayo probeta torsión.....	65

Figura 55. Simulación ensayo flexión.....	66
Figura 56. Simulación ensayo flexión.....	67
Figura 57. Graficas de correlación. ....	70
Figura 58. Elementos grafica de control. ....	70
Figura 59. Graficas de correlación. ....	71
Figura 60. Graficas de correlación Método Taguchi software minitab. ....	78
Figura 61. Graficas de correlación Método Taguchi software minitab. ....	79
Figura 62. Graficas de correlación Método Taguchi software minitab. ....	80
Figura 63. Graficas de correlación Método Taguchi software minitab. ....	81
Figura 64. Graficas de correlación Método Taguchi software minitab. ....	82
Figura 65. Graficas de correlación Método Taguchi software minitab. ....	83
Figura 66. Modelo flexión.....	88
Figura 67. Modelo torsión.....	88
Figura 68. Máquina TESTRESOURCES para ensayo de Tracción. ....	98
Figura 69. Placa técnica de la capacidad de la máquina. ....	98
Figura 70. Máquina AVERY para ensayo de torsión .....	99
Figura 71. Placa técnica de la máquina AVERY para ensayo de torsión .....	99

## RESUMEN

El presente trabajo introduce una descripción del panorama actual alrededor de la Impresión 3D en el Ecuador y la implementación de esta tecnología emergente en conjunto con los parámetros que rigen los fenómenos presentes que conlleva este innovador proceso de manufactura. En actualidad, las empresas implementan en sus procesos la tecnología de fundición de filamento (FDM) para crear prototipados rápidos de elementos repuestos o artículos personalizados para el consumidor final. Para que se logre un correcto uso de esta tecnología en el sector industrial es necesario conocer las propiedades específicas, dentro de los parámetros en la impresión, como temperaturas, velocidad de desplazamiento del extrusor, densidad y patrón de relleno para cada material, para este trabajo se utilizó PLA, para lograr eficiencia en el producto final resultante del proceso de manufactura. Para comprobar la resistencia a la flexión después de establecer los parámetros requeridos se utiliza la norma ASTM D790 – 17 que brinda la información correspondiente para validar resultados obtenidos al final de los ensayos destructivos. En el caso de las propiedades generadas por la torsión se rige el ensayo y sus resultados en base a la norma ASTM E143 – 13 que posee directrices generales a considerar pero que se pueden adaptar a las condiciones disponibles. Finalmente, el trabajo realiza una comparación respecto a los resultados obtenidos en resistencia a la flexión y torsión para el proceso de fabricación por Impresión 3D a través de la experimentación y la simulación realizadas previamente. Se valida de esta manera la influencia de los patrones de relleno y la densidad de relleno en las características mecánicas obtenidas por medio de la técnica FDM de Impresión 3D.

**Palabras clave:** Tecnología emergente, parámetros impresión, tecnología de filamento, desplazamiento del extrusor, manufactura, normas ASTM



## ABSTRACT

This paper introduces a description of the current landscape around 3D Printing in Ecuador and the implementation of this emerging technology along with the parameters that govern the present phenomena involved in this innovative manufacturing process. Currently, companies are implementing filament die casting (FDM) technology in their processes to create rapid prototypes of spare parts or customized items for the final consumer. In order to achieve a correct use of this technology in the industrial sector it is necessary to know the specific properties within the parameters in printing such as temperatures, extruder displacement speed, density and filling pattern for each material, for this work PLA was used, to achieve efficiency in the final product resulting from the manufacturing process. To check the flexural strength after establishing the required parameters, the ASTM D790 - 17 standard is used, which provides the corresponding information to validate the results obtained at the end of the destructive tests. In the case of properties generated by torsion, the test and its results are governed based on ASTM E143 - 13, which has general guidelines to be considered but which can be adapted to the available conditions. Finally, the work makes a comparison with respect to the results obtained in resistance to bending and torsion for the manufacturing process by 3D printing through experimentation and simulation previously carried out. The influence of filler patterns and filler density on the mechanical characteristics obtained by the FDM 3D Printing technique is thus validated.

**Keywords:** Emerging technology, printing parameters, filament technology, extruder displacement, manufacturing, ASTM standard.

## INTRODUCCIÓN

La impresión 3d fundamentada en la segmentación por hilo fundido ha generado gran expectativa en el mundo hoy en día, por la facilidad de desarrollo de estructuras a partir de diseños computacionales de toda índole, abierto al ámbito tecnológico que ha generado un sin número de aplicaciones ahorrando tiempo y dinero en comparación a otras tecnologías [1].

Dentro del rango tecnológico la Impresión 3D abarca a un sin número de áreas entre las que destacan la industria aérea, automotriz, espacial, médica y naval que han incursionado en la creación de modelos físicos en función a las necesidades que cada industria presenta en base a su funcionalidad del modelo de producción [2].

Para el proceso de impresión es fundamental conocer las propiedades físico químicas del material con el que se va a trabajar, cada material cuenta con condiciones específicas en base a su aplicación y las condiciones bajo las cuales se van a someter las estructuras. Los datos relevantes relacionados a propiedades de materiales utilizados en impresión 3D bajo patones de relleno inferiores al 80% son reducidos [2], por lo tanto, el presente trabajo desarrolla el análisis bajo ensayos de flexión y torsión sustentado bajo normas ASTM y verificado en función a sus resultados mediante el uso de software de elementos finitos a fin de comprobar la veracidad de los datos prácticos.

## ANTECEDENTES

Con la implementación de la tecnología 3d en procesos de manufactura resulta importante conocer las propiedades y configuraciones optimas de los productos obtenidos mediante este proceso, por lo que, para verificar dichos comportamientos es necesario someter al material a ensayos de tracción y compresión en donde se pueda verificar los parámetros a controlar como densidad de relleno, patrón de relleno, resistencia a la fractura, entre otros para así estudiar estadísticamente a fin de determinar la varianza entre los resultados obtenidos en base a las probetas [3].

Debido a un gran impacto de los distintos materiales poliméricos por el alto grado de consumismo existe una nueva tecnología que a la actualidad se ha desarrollado de manera exponencial como es la impresión 3D bajo la cual se permite obtener un producto modelado de manera física [4] por lo que es apropiado descubrir las características mecánicas de los elementos que se pueden lograr bajo esta tecnología, siendo el propósito de la investigación el recopilar información válida en base a configuraciones capaces de ser implementados en elementos obtenidos con este tipo de modelación dentro de la industria.

La industria ecuatoriana que ha incursionado en la impresión 3D es limitada ya que en el país la tecnología se encuentra en fase de introducción por lo que la producción a gran escala es tardía, sin embargo, dicha tecnología ha generado gran desarrollo al ser amigable con el ambiente, siendo una opción sostenible gracias al uso de filamentos como el PLA que es un elemento biodegradable.

El propósito de este proyecto, es recabar información práctica y datos confiables acerca de la innovación de la manufactura con impresión 3D; mediante la utilización de filamentos PLA como materia prima que se comercializa en el Ecuador, y así, poder analizar las distintas capacidades de aplicación que posee la tecnología en diversos sectores de la industria ecuatoriana, a fin de aportar con una nueva perspectiva y cambiar la visión de la matriz productiva con determinados elementos, en un campo competitivo donde se pueda sacar provecho a relaciones como cantidad calidad tiempo y dinero aportando a la vez con el desarrollo sostenible del planeta.

Objetivos generales.

Establecer la capacidad de resistencia a la flexión y torsión del material PLA mediante impresión 3D bajo configuración panal de abeja con porcentaje de relleno del 50%.

Objetivos específicos.

- Verificar las propiedades químicas y mecánicas del material PLA en estado de suministro mediante la realización de ensayo mecánico y normativa ASTM D790-17 y ASTM D5279-13.
- Establecer los parámetros para el dimensionamiento y fabricación mediante impresión 3D de las probetas para flexión y torsión según lo establecido en norma ASTM D790-17 y ASTM D5279-13.
- Determinar las propiedades mecánicas de las probetas en material PLA fabricadas bajo impresión 3D sometidas bajo ensayos de flexión y torsión según lo establecido en normativa ASTM D790-17 y ASTM D5279-13.
- Simular el comportamiento teórico de los resultados de las propiedades mecánicas obtenidas del ensayo de flexión y torsión con el empleo de software de elementos finitos.
- Realizar un análisis comparativo de los resultados experimentales y teóricos obtenidos empleando los métodos estadísticos ANOVA y Taguchi.

# CAPÍTULO I

## MARCO TEÓRICO

### 1.1 Historia

En los años 80 la aparición de la modelación digital comenzó con el desarrollo de técnicas automáticas como la Modelación por Deposición en Fundido (MDF), denominada como la primera técnica en tercera dimensión de la época la cual con el pasar del tiempo se ha ido perfeccionando llegando al modelado por impresión 3D el cual parte del diseño de datos modelados por computadora CAD (Computer Aided Design) que posterior serán plasmados con la deposición de un filamento polimérico fundido [5].

De acuerdo Cepeda & Rubio [5], a continuación, se presenta la siguiente figura acerca del diagrama del proceso de modelación por deposición en fundido:

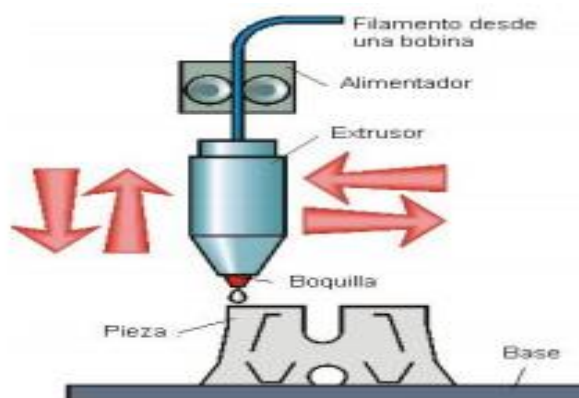


Figura 1. Diagrama de proceso de modelación por deposición en fundido [4]

A lo largo del tiempo la implementación de nuevas tecnologías ha sido pieza fundamental para el desarrollo de una nación, el Ecuador un país encaminado a la implementación tecnológica en su estructura ha incursionado en la adaptación de sus distintos modelos de producción al mundo actual por lo que ha transformado su matriz de generación de ingresos al producto nacional relegando a las importaciones e impulsando a la inclusión de tecnologías que den a sus productos un valor agregado así como la máxima rentabilidad y sustentabilidad posible.

Titusunta & Yanchapaxi [2], en Ecuador la competitividad respecto a las industrias extranjeras se ha incrementado gracias a la implementación de proyectos de crecimiento industrial a fin incrementar la sustentabilidad de dichas industrias conllevándolas al sostenimiento medio ambiental a fin de combatir los cambios climáticos, disminuir el proceso de manufactura, incrementar la rentabilidad, haciendo más flexible la producción o fabricación de los distintos tipos de elementos a producir modificando la manera de producción haciéndola más competitiva a los ojos del mercado nacional e internacional.

## **1.2 Propiedades Fisicoquímicas del material**

Mediante la unión de cientos a miles de moléculas denominadas monómeros se estructuran los polímeros que se clasifican en tres clases termoplásticos, termoestables y elastómeros, basándose en su naturaleza y comportamiento mecánico [6], de igual manera detallan que dentro de la impresión 3d se utilizan rollos de filamento de polímeros termoplásticos dentro de los cuales el ABS (acrilonitrilo butadieno estireno) y PLA (ácido poli-láctico) que ocupan el 95% del campo como materia prima.

Cepeda & Rubio [5], resaltan la importancia en el conocimiento de los materiales poliméricos con los que se trabaja dentro de la impresión 3d a fin de minimizar la generación de desperdicios estimando un conjunto de propiedades que influyen al momento del procesamiento del material, así mismo la comprensión de los parámetros del material sin procesar y los parámetros de construcción o diseño final que repercutirán sobre la eficiencia y reducción de costos en manufactura lo que hace atractivo al modelo de producción a la hora de producir estructuras con compleja geometría.





En la industria el termoplástico PLA ha ganado presencia gracias a las características que comparte con materiales poliméricos de origen petroquímico como resistencia a la humedad, resistencia a la tracción y ciertos niveles de elasticidad que lo hacen atractivo al mercado [7].

### 1.2.1 Ácido poli-láctico (PLA)

El polímero biodegradable ácido poli-láctico (PLA) fabricado gracias a recursos 100% renovables contiene un conjunto de características superiores a plásticos petroquímicos con características relevantes respecto a su módulo de elasticidad comparable al polietileno y con ventajas sobre el mismo por su baja transferencia del calor y estabilidad a la luz ultra violeta resultando un polímero que no se decolora [6].

Cepeda & Rubio [5], el PLA posee características compatibles con distintos polímeros de origen natural mediante las cuales este se puede mezclar lo que amplía su capacidad para mejorar sus capacidades de resistencia y con un potencial para reemplazar a los plásticos tradicionales gracias a su poca inversión en equipos para el proceso.

De acuerdo Molina [6], en la siguiente tabla se indica las principales características técnicas del PLA por colores:

Tabla 1. Características técnicas del PLA por colores [6]			
Color del PLA		Temperatura de Fusión [°C]	Temperatura de Pre calentamiento de la Mesa [°C]
Natural		180 - 200	71
Amarillo		215 - 230	69
Rojo		190 - 220	58
Negro		185 - 210	71

### 1.2.2 Estructura del PLA

La producción del PLA se puede dar a partir de condensación – polimerización directa desde el monómero ácido láctico que surge gracias a la fermentación de fuentes procedentes de carbohidratos tales como maíz, caña de azúcar etc. La composición química contiene un átomo asimétrico de carbono denominado hidroxilácido en conjunto con dos isómeros ópticos L (+) y D (-) obtenidos a partir de la fermentación bacteriana de carbohidratos [7].



Figura 2. Estructuras químicas de los isómeros de ácido láctico. [7].

### 1.2.3 Propiedades térmicas y mecánicas del PLA

Para la manipulación del polímero es necesario conocer las propiedades que el mismo presenta en el caso de las propiedades térmicas el material presenta una alta resistencia por deformación térmica respecto a otros polímeros por otro lado dentro de las propiedades mecánicas su resistencia a la tensión elongación y esfuerzo de flexión presentan características que hacen al material rígido lo cual hace que resista la abrasión y absorba con mayor facilidad los esfuerzos de deformación [8].



Tabla 2. Propiedades térmicas y propiedades del material PLA [8]

Propiedades térmicas	PLA
Peso molecular (kg/mol)	66
Gravedad específica	1270
Densidad del solido (kg/m <sup>3</sup> )	1252
Tg (°C)	55
Tm (°C)	165
Capacidad Calorífica (J/Kg. °C)	
190 °C	2060
100 °C	1955
55 °C	1590
Conductividad Térmica (W/m.°C)	
190 °C	0.195
100 °C	1.197
55 °C	0.111

Tabla 3. Propiedades Mecánicas [8]

Propiedades Mecánicas	PLA
Resistencia a la tracción (MPa)	59
Alargamiento a la rotura (%)	7
Módulo elástico (MPa)	3500
Módulo de corte (MPa)	1287
Radio de Poisson	0.36
Rendimiento	70
Resistencia a la flexión (MPa)	106
Dureza (HR)	88
Temperatura de reflexión térmica (°C)	55
Porcentaje de elongación (%)	11.3
Módulo de Young (MPa)	1280

Reinoso [7], la estructura molecular del material PLA varia en el proceso de polimerización ajustando entre un valor del 0 al 40% además de que al incrementar el peso molecular existe dificultad al momento de la fabricación por modelado extrusión y conformado en compensación se incrementan ciertas propiedades como lo son viscosidad resistencia a altas temperaturas y resistencia a tracción y flexión gracias a la disminución del movimiento de las cadenas presentes en el polímero.

### **1.3 Tipos de materiales producidos en base a la creación de objetos 3d**

Gracias a reconocimientos de la Administración de Medicamentos y Alimentos FDA. (Food and Drug Administration) en la cual acepta al PLA como material seguro su aplicación es apta para fabricación de empaques para alimentos dando garantías en la protección del producto gracias a sus propiedades contra humedad, grasas, luz entre otros además es apto para la fabricación de empaques resistentes a la humedad, así como el envasado de bebidas [9].

Dentro de la industria medica se ha incursionado dentro de este modelo de producción en la implementación de implantes dentales, variaciones al yeso como elementos de inmovilización soportes de extremidades [10], dentro del campo de las cirugías en la producción de materiales de sutura para cirugías ortopédicas con implantes reabsorbibles, tornillos, placas, grapas, para cirugías reconstructivas craneofacial y maxilofacial.

Al ser un polímero biodegradable se ha implementado su aplicación en la reconstrucción de tejidos como piel huesos cartílagos, además es conocido en la industria para micro encapsular medicamentos tales como insulina, cisplatino, taxol, antiinflamatorios, entre otros [11].

En la industria textil gracias a sus propiedades estables frente a la luz ultravioleta las telas producidas con este material presentan una mayor duración ya que presentan poca decoloración donde se utiliza para la confección de prendas de vestir, tapicería de muebles, fabricación de pañales entre otros. [Obtención de Ácido poliláctico Guanoluisa]

En la industria automotriz Tellez [12], gracias a la facilidad de modelado puede ser implementado en la línea de ensamblaje para fabricación de autopartes y prototipos a fin de alivianar cargas en el producto final, la industria automotriz ha implementado la fibra de PLA en la fabricación de paneles interiores techos porta vasos molduras tableros entre otros.

El material PLA presenta un sin número de aplicaciones en distintas ramas e industrias llegando a ser un material muy noble y compatible por sus características pasando por aplicaciones dentro de cirugías hasta generación de equipos e instrumentos industriales.

#### **1.4 Ensayos de sometimiento al filamento PLA**

##### **1.4.1 Ensayo de tracción al filamento PLA**

El ensayo de tracción deforma una probeta al aplicar una carga de tracción midiendo la resistencia del material sometido a fuerzas externas aplicadas con incremento gradual [7]. El ensayo se fundamenta en el alargamiento de la probeta a mediante el cabezal móvil el cual a través de un sensor denominado extensómetro que relaciona la variación de longitudes en función de la calibración por señales marcadas al aplicar la carga [13], en la siguiente figura se presenta un perfil esquemático de una máquina para ensayos de tracción.

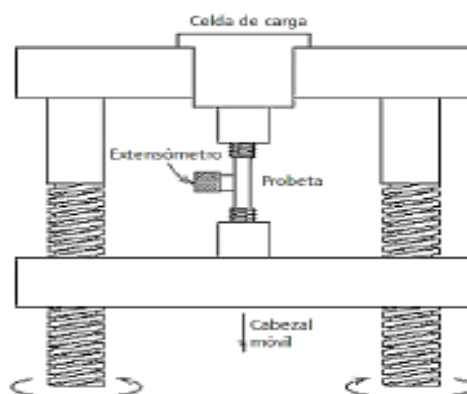


Figura 3. Perfil Esquemático Maquina para ensayos de tracción. [13]

La normativa ASTM D2256 – 02 es utilizada para verificar las propiedades de tracción del filamento PLA la cual rige parámetros operativos de maquinarias, materiales y características geométricas que poseen los mismos.

De acuerdo con Titusunta, & Yanchapaxi [2], la expresión matemática que determina la variación de elongación en un ensayo de tracción viene dada por la siguiente ecuación:

( 1)

$$E\% - fil = \frac{ExRx100}{CxLg}$$

**Donde:**

E% - fil = Porcentaje de elongación del filamento

E: Distancia a lo largo del eje de fuerza cero correspondiente al punto donde alcanza la fuerza de pretensión, mm (in).

R: Velocidad de ensayo mm/min (in/min)

C: Velocidad de generación de diagrama fuerza posición, mm/min (in/min)

Lg: Longitud nominal entre agarre, mm (in)

#### 1.4.2 Ensayo de flexión al filamento PLA

Titusunta, & Yanchapaxi [2], la normativa ASTM D700-17 es la encargada de analizar las propiedades de flexión respecto a materiales plásticos en función al análisis sobre una probeta sometida a cargas con tres puntos de aplicación. Es importante el conocimiento de la formulación matemática que describe la velocidad en función de la fuerza que transfiere la maquina a la probeta que está dada por la siguiente ecuación:

( 2)

$$R = \frac{ZxL^2}{6d}$$

**Donde:**

R: Tasa de desplazamiento del cabezal, mm (in)/min.

L: Distancia entre soportes, mm(in).

d: Espesor de la probeta a ensayar, mm (in).

Z: Tasa de alargamiento de la última fibra, mm/mm/min (in/in/min) Z debería ser igual a 0.01.

Las propiedades de flexión son descritas bajo la norma D790-17 dentro de las cuales se describirá la resistencia a la flexión o Esfuerzo de flexión ( $\sigma_f$ ) descrito por la siguiente ecuación: [2].

( 3)

$$\sigma_f = \frac{3PxL}{2bxd^2}$$

**Donde:**

$\sigma$ : Esfuerzo en las fibras más extensas en el punto medio. MPa (psi)

$P$ : Carga en un punto dado en la curva carga –deflexión. N (lbf).

$L$ : Distancia entre soportes, mm (in).

$d$ : Espesor de la probeta a ensayar, mm (in)

La variación de la longitud de la probeta en sus partes externas es descrita con deformación por flexión la cual viene dada por la respectiva ecuación [2].

( 4)

$$\epsilon_f = \frac{6Dxd}{L^2}$$

**Donde:**

$\epsilon_f$ : Deformación en la parte más extensa, mm/mm (in/in).

$D$ : Deflexión máxima desde el centro de la probeta, mm (in).

$L$ : Distancia entre soporte, mm (in).

$d$ : Espesor de la probeta a ensayar, mm (in)

Así mismo la deformación en la parte más extrema con relación a la proporcionalidad del módulo de elasticidad según la proporcionalidad del esfuerzo de deformación con la curva de carga aplicada viene dada por la correspondiente ecuación [2].

Las curvas características de esfuerzo de flexión contra deformación vienen dadas en base a la norma D790-17, por cuanto es necesario un mínimo de 5 ensayos para analizar las propiedades de flexión tomando en cuenta las condiciones de trabajo a la cual someterá la maquina en el ensayo [2].

( 5)

$$E_B = \frac{L^3xm}{4bxd^3}$$

**Donde:**

$E_B$ : Deformación en la parte más extensa, mm/mm (in/in).

$L$ : Distancia entre soporte, mm (in).

$b$ : ancho de la probeta, mm (in).

$d$ : Espesor de la probeta a ensayar, mm (in)

$m$ : Pendiente de la tangente en la proporcional recta de la curva carga deformación.  
N/mm (lbf/in).

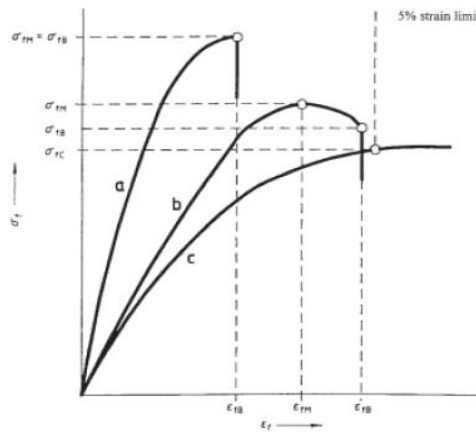


Figura 4. Curvas típicas de esfuerzo flexión contra deformación. [2]

### 1.4.3 Ensayo de torsión al filamento PLA

En base a Beer & Johnston [14], el ensayo de torsión al filamento PLA, se encarga de describir el comportamiento donde se concentra el esfuerzo torsional en la probeta, a continuación, se describe en la figura 5, los factores de concentración de esfuerzos para el caso, el módulo cortante a temperatura ambiente es dado por la normativa E143-13.

( 6)

$$\tau_{max} = K \frac{Txc}{J}$$

**Donde:**

$\tau_{max}$  : Esfuerzo cortante máximo por torsión pura

$T$ : Torque aplicado sobre el eje

$c$ : radio de giro del eje de menor diámetro

$J$ : Momento polar del eje de menor diámetro

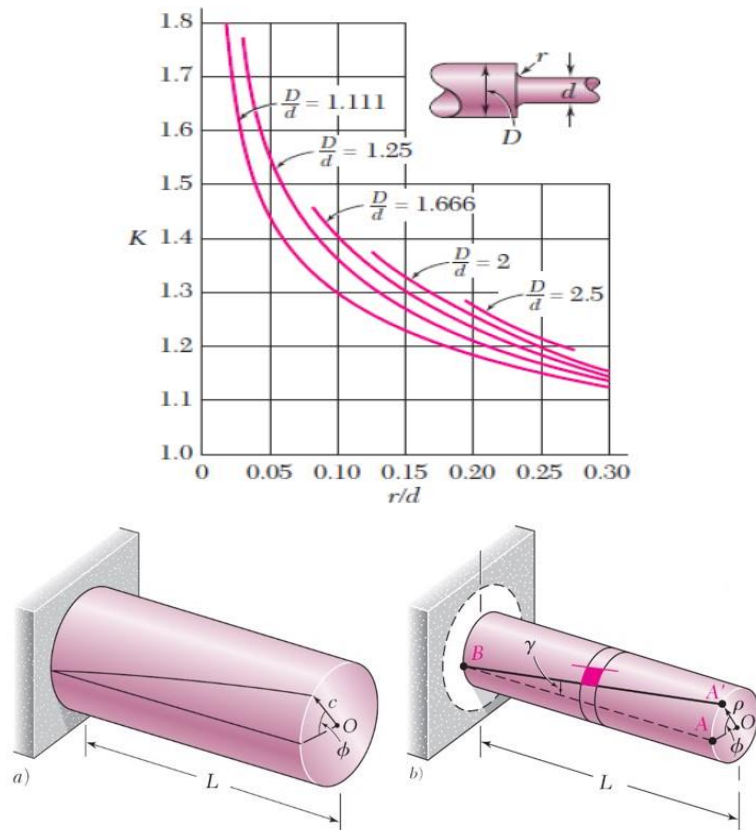


Figura 5. Factores de concentración de esfuerzos para filetes en ejes circulares de sección variable. [13]

Titusunta & Yanchapaxi [2], cuantifican el fenómeno de deformaciones ocasionadas por el sometimiento de cargas torsionales lo describe la variable deformación a cortante aplicando la relación establecida en la Ley de Hooke la cual expresa que la deformación elástica que experimenta un objeto es proporcional a la fuerza que lo genera dando la ecuación.

(7)

$$\gamma_{\text{máx}} = \frac{cx\phi}{L}$$

**Donde:**

$\gamma_{\text{máx}}$ : Deformación a cortante máximo, rad.

$c$ : radio de giro del eje, mm.

$\phi$ : Ángulo de giro, rad.

$L$ : Longitud del eje, mm.

Según Titusunta & Yanchapaxi [2], el módulo de corte (G) sustentado bajo la normativa D143-13 viene dado por la siguiente ecuación.

( 8)

$$G = \frac{TxL}{Jx\phi}$$

**Donde:**

*G*: Módulo de cortante del espécimen. MPa (psi).

*T*: Torque de aplicación. N m (lbf in).

*L*: Longitud de calibre. M (in).

*J*: Momento polar de inercia de sección alrededor de su centro. M<sup>4</sup> (in<sup>4</sup>).

$\phi$ : Ángulo de torsión, rad.

En el rango elástico, el ángulo de rotación  $\phi$  es proporcional al par *T* aplicado al eje y responde a la siguiente ecuación:

( 9)

$$\phi = \frac{T L}{G J}$$

En la prueba de torsión, el propósito es determinar el módulo elástico de cortante o el módulo de rigidez *G* conociendo la longitud y el diámetro de la muestra, que se obtiene mediante la fórmula 9. Al medir el par aplicado *T* y el ángulo de rotación  $\phi$ . Se genera una expresión que no excede el límite elástico para lo cual es recomendable realizar varios ensayos a fin de obtener un valor *G* promedio [15].

De acuerdo con Askeland & Wright [13], el momento polar de inercia viene dado por la siguiente ecuación:

( 10)

$$J = \frac{\pi D^4}{32}$$

**Donde:**

*D*: Diámetro del espécimen. M (in).

*J*: Momento polar del eje de menor diámetro



Ganán & Mullo [16], describen al fenómeno de torsión sobre el eje circular como se observa en la figura 6 y 7, donde se esquematiza el soporte de las deformaciones rotacionales. Además, se describe la generación de una grieta a  $45^\circ$  en materiales frágiles que no soportan cargas axiales.

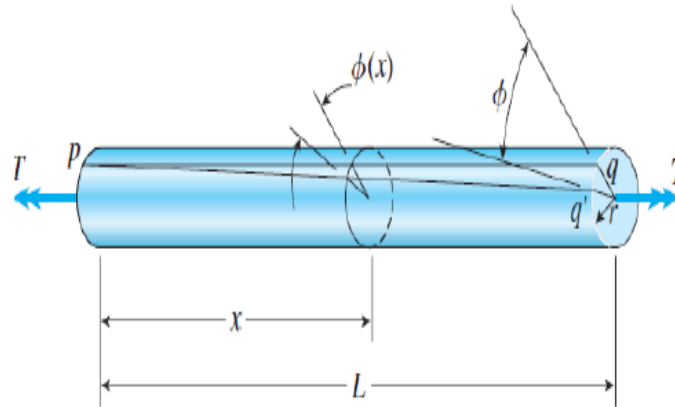


Figura 6. Esquema fenómeno torsional. [16]

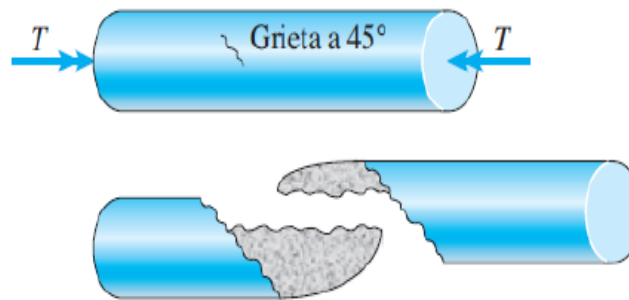


Figura 7. Fenómeno materiales frágiles. [16]

### 1.5 Tecnologías para el procesamiento en la impresión 3d

Dentro de la materialización del procesamiento digital los mecanismos utilizados para la fabricación de piezas aplican un conjunto de técnicas que varían en función del suministro y del producto final deseado.

Las tecnologías dentro de la impresión 3D para la elaboración de los prototipos abarca las tecnologías aditivas las cuales superponen al material capa por capa hasta conseguir el modelo final siendo en la actualidad una de las más populares ya que se adapta a cualquier geometría, sustractivas que parten de un bloque de material transformándolo por sustracción de exceso de material en la pieza final, conformado por modelación a través de una serie de transformaciones mediante el uso de fuerzas y moldes, híbridas las cuales utilizan dos o más tecnologías [17]

### 1.5.1 Técnicas de Fabricación Aditivas

Estero litografía consiste en el cambio de estado viscoso ha solido por exposición a la luz en base al desplazamiento de un láser encargado de reproducir el objeto accionando la resina y produciendo la forma del objeto deseada al finalizar el recorrido la plataforma desciende por accionamiento de un pistón realizando el proceso por capas hasta la producción final del elemento [17].

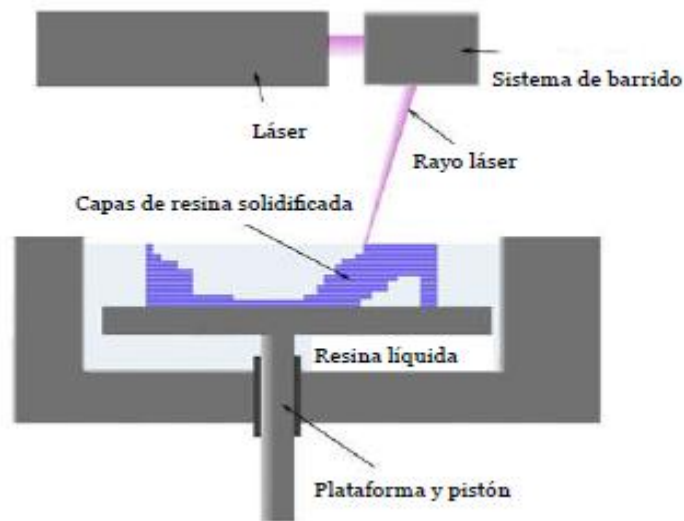


Figura 8. Esquema de un aparato de estereografía. [17]

Esta técnica posee una variedad de aplicaciones en el campo médico y odontológico gracias a su excelente acabado estudio no invasivo, así como la producción de todas las estructuras anatómicas [18].

PolyJet basa su impresión en la generación de una serie de capas de fotopolímeros curados al instante con luz UV para estructurar el modelo solido que puede adaptarse a complejas geometrías, en la actualidad existen sistemas capaces de combinar materiales a fin de optimizar las características para un mismo prototipo [17].

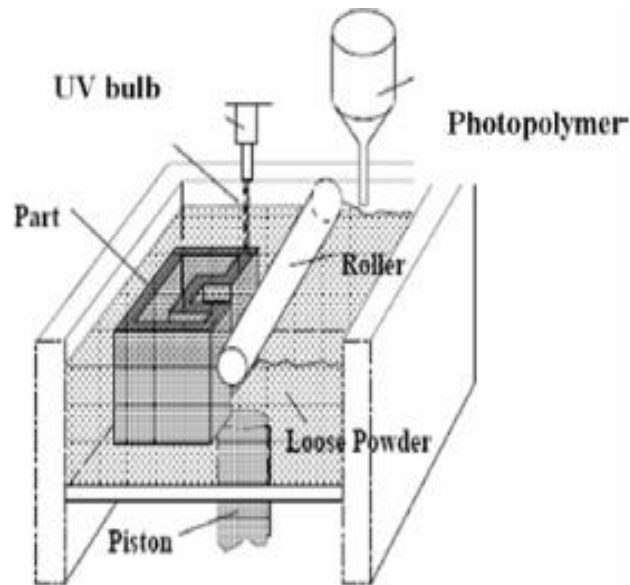


Figura 9. Esquema proceso PolyJet. [19]

Sinterizado laser selectivo (SLS) fabrica piezas por sinterización de partículas de diferentes materiales mediante un láser que solidifica fusionando el polvo de suministro precalentado mediante el barrido transversal por capas a cierta temperatura sin la necesidad de soportes de apoyo [18].

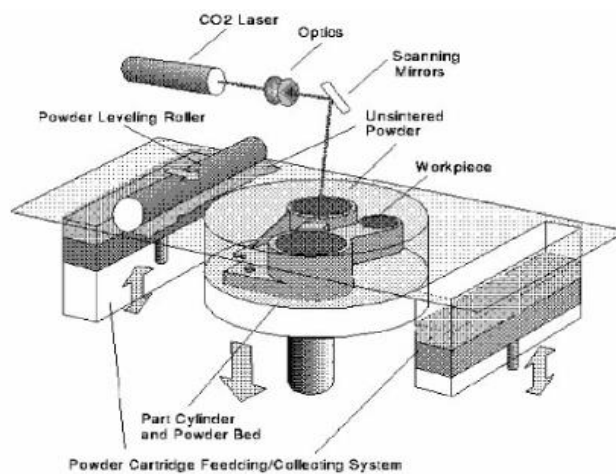


Figura 10. Esquema proceso sinterizado laser. [18]

Modelado por deposición fundida se genera por la adición de un filamento de material plástico o metálico el cual es extruido por una boquilla emisora de calor la cual funde al material y lo expulsa por flujo controlado desplazándolo en los ejes X, Y, Z en función a su geometría es expulsado a una superficie de soporte para minimizar los efectos de la gravedad y la obtención del producto final [18].

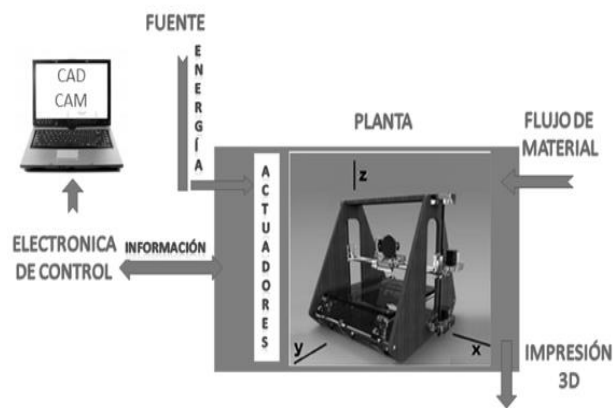


Figura 11. Esquema proceso modelado por deposición fundida. [20]

### 1.5.2 Dispositivos para el procesamiento en la impresión 3d

Según [Diseño e Impresión Objetos] Corporación Z desarrollo las primeras máquinas en base a la tecnología 3D en la década de 1980 impresoras con técnicas de estereografía, años después la empresa Stratasys implemento la impresión por deposición de material fundido (FDM) patentándola siendo hoy unos de las técnicas más utilizadas conforme con el incremento de la demanda organizaciones desarrollaron equipos e insumos enfocados a la tecnología 3D llegando a la apertura de código en 2005 gracias al diseño de una impresora 3D en el proyecto denominado RepRap [17].

En la actualidad, se han creado variaciones a los modelos RepRap modelos que se han popularizado en instituciones educativas y hogares por su facilidad de acceso dentro de los más populares Prusa i3 [17].

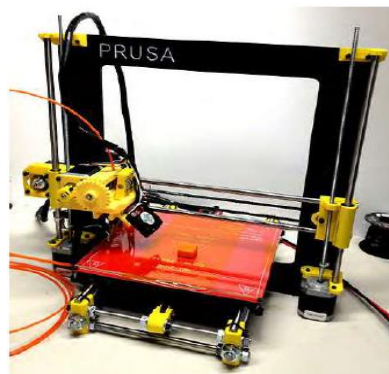


Figura 12. Impresora modelo Prusa i3. [17]

### 1.5.3 Análisis costo beneficio para la introducción de la tecnología en la industria ecuatoriana

La incursión tecnología de la impresión 3D dentro del Ecuador ha sido comandada por ciertas empresas pioneras en donde destaca INNOVA 3D la cual suministra y provee servicio integral de impresión, insumos, hasta venta de maquinaria evolucionando en sus ventas locales a lo largo de su trayectoria [21]



Figura 13. Evolución de ventas INNOVA 3D. [21]

En palabras del gerente, la empresa ha contribuido al negocio brindándoles la comodidad en comparación con mecanismos de fabricación tradicionales, al poder desarrollar ideas a muy bajo costo, además de poder imprimir series ilimitadas de productos o promociones personalizadas para potenciar [21]. INNOVA 3D en su página web detalla una amplia gama de impresoras y materiales relacionados a la impresión 3D de acorde a su utilidad.

Tabla 4. Gama Impresoras empresa INNOVA 3D [21]

Modelo Impresora	Costo \$
Creality Ender 3	486.61
Artillery Sidewinder X1	650
Creality CR-10S	1026.79
Creality CR-10S5	1294.64
Creality CR-10S PRO	1339.29
Rostock Max V3.1	1875
Artemis 300	3616.07
Creality CR5080	7053.57

Tabla 5. Materiales impresión 3D empresa INNOVA 3D [21]

<b>Tipo de material</b>	<b>Costo \$</b>
Filamento PLA	486.61
Filamento ABS	650
Primalloy	1026.79
Polymaker Polyte PLA	1294.64
Polymaker PC-Max	1339.29
Polymaker PolyPlus PLA	1875
Cheetah	3616.07

#### **1.5.4 Aplicaciones mecánicas en elementos manufacturados por impresión 3d “en base al sometimiento de los esfuerzos flexión torsión o combinación de ambos”**

La creación de elementos bajo impresión 3D dentro de la industria plástica ha innovado en la producción de nuevos prototipos para la producción principalmente de juguetes y envases para alimentos los cuales por su naturalidad son sometidos a una combinación de cargas y que deben ser resistentes a las mismas. Dentro de la industria de electrodomésticos, en este tipo de industria la precisión de las piezas logradas es muy alta en aparatos eléctricos, al estar sujetas a variación de temperatura, flujo de líquido, flujo de aire, humedad e incluso vibraciones. [21]. Una de las industrias que más ha incursionado en el uso de esta tecnología es la automotriz llegando a producciones en masa de partes o piezas de vehículos llegando incluso en el caso de la empresa británica Bentley a la producción de vehículos completos según [21].

Dentro de la industria médica uno de los principales aportes es en la ortopedia donde se ha mejorado el nivel de calidad de la prótesis rígida, llegando casi al nivel de excelencia, en el que la prótesis puede adaptarse casi perfectamente al paciente. En campos similares, como los implantes de cadera, e incluso en otros casos, incluso en los maxilares, las impresoras 3D también han revolucionado objetos o piezas con un rendimiento excelente [21].

## CAPÍTULO II

### DESARROLLO EXPERIMENTAL

#### 2.1 Información técnica de los equipos encargados del proceso de impresión “software y maquinaria”.

El proceso de materialización de un diseño parte de un esquema mental en función de una idea a partir de un estudio relacionado a un problema que contiene ciertas necesidades que se busca resolver, luego este esquema se plasmara en un diseño digital mediante herramientas de diseño 3D configurables por una interfaz adaptándolas y parametrizándolas a la geometría deseada donde el software procesara la información y la enviara a la impresora en código G para que la impresora deposite el material en función al elemento diseñado y que finalmente terminara siendo materializado en un objeto físico [21].



Figura 14. Fases proceso de diseño. [22]

La creación del producto final dentro de la impresión 3D se fundamenta en las características y especificaciones dadas por el diseñador según Reinoso [7], estas se pueden asociar en tres:

a. Diseño digital. – Parte en función a un concepto esquemático que busca la resolución de cierto problema el mismo que contiene un conjunto de alternativas de diseño, según [Reinoso] para la creación de un archivo digital en 3D entre los más reconocidos se presentan software como: Google Sketch Up, Onshape, SolidWorks y AutoCAD [7].

b. Procesado del diseño. – Posterior al ingreso del diseño digital en 3D mediante algún tipo de software el mismo identificará los parámetros y propiedades en las cuales se realizará el diseño y transferencia de información a la impresora en base a la interfaz a la que la misma pueda para parametrizarse y así proceder con la impresión [2]

c. Post- procesado. – Consiste en evaluar los resultados requeridos que se han efectuado en el proceso de impresión siendo este un factor crítico en la producción final que deben encontrarse dentro de los parámetros y características de diseño estimadas [22]. En caso de que el material procesado no cumpla con las metas requeridas en este proceso se puede implementar un acabado superficial a fin de expulsar materiales auxiliares o elementos ajenos al material [23].

## **2.2 Metodología para el estudio experimental para la obtención de los resultados requeridos**

Existen dos procedimientos para el estudio de materiales poliméricos: análisis termo gravimétrico y ensayos mecánicos, los cuales son tracción, flexión y torsión [24]

### **2.2.1 Análisis termo gravimétrico**

Este análisis mide la relación entre el peso de la muestra y el tiempo o temperatura en un ambiente controlado estático o dinámico, y se obtiene el resultado del aumento o disminución de peso. El propósito del análisis es capturar cambios, como descomposición, sublimación, reducción, absorción, etc. Para la puesta en marcha se debe contar con equipos tales como: micro balanza, horno, termopar, controlador de gas y caudal cada instrumento con su equipo de medición [24].

### **2.2.2 Ensayos mecánicos.**

El estudio de las propiedades mecánicas incluye saber si el polímero es lo suficientemente fuerte para soportar una carga mecánica específica. Como grupo de materiales, los polímeros tienen diferentes características en función de su comportamiento, las cuales varían bajo las condiciones de ejecución en cada ensayo, como deformación, temperatura y cambios en sus propiedades [24].



Es importante detallar que cada tipo de ensayo es normalizado con la finalidad de que el análisis de propiedades de cualquier tipo de polímero sea idóneo y se pueda estandarizar en los estudios realizados.

### **2.3 Establecimiento de las normas apropiadas para el ensayo de flexión y torsión al cual se someterá el material**

Normativa ASTM D790- 17 encargada de medir ensayos de flexión de plásticos basándose en el sometimiento de carga sobre una probeta con tres puntos de aplicación, estableciendo dentro de sus parámetros el análisis de por lo menos un mínimo de 5 ensayos con variabilidad de condiciones tolerables para encontrar sus propiedades de flexión, así mismo estandariza el conocimiento y establecimiento de la maquina encargada de realizar el procedimiento para un ensayo experimental satisfactorio [2, p. 32].

Normativa ASTM E143- 13 adecua el procedimiento que permite determinar el módulo cortante a temperatura ambiente, dentro de esta los valores de las propiedades de torsión como módulo de corte son regidos bajo la norma D143-13 [2, p. 40].

### **2.4 Estudio de los parámetros apropiados para el proceso de impresión**

Después del diseño del elemento a imprimir en un software CAD la configuración de los parámetros dependerá del software de cada impresora, dentro de la extensión de parámetros a modificar se explicarán los más comunes y relevantes para el efecto a la hora de la impresión [25].

Así mismo Álvarez & Lagos [26], resalta que dentro de la impresión 3d en base al proceso de modelado por deposición fundida se puede controlar las propiedades características del material en función a los parámetros estimables mediante software por los cuales se imprime un objeto.

### 2.4.1 Espesor Capa

Reinoso [7], establece como la dimensión estimable en función al conjunto de capas depositadas relacionado al diámetro de la boquilla extrusora, además afirma que el rango óptimo para el espesor de cada capa puede rondar dentro del 40 a 80 % del diámetro de la boquilla.

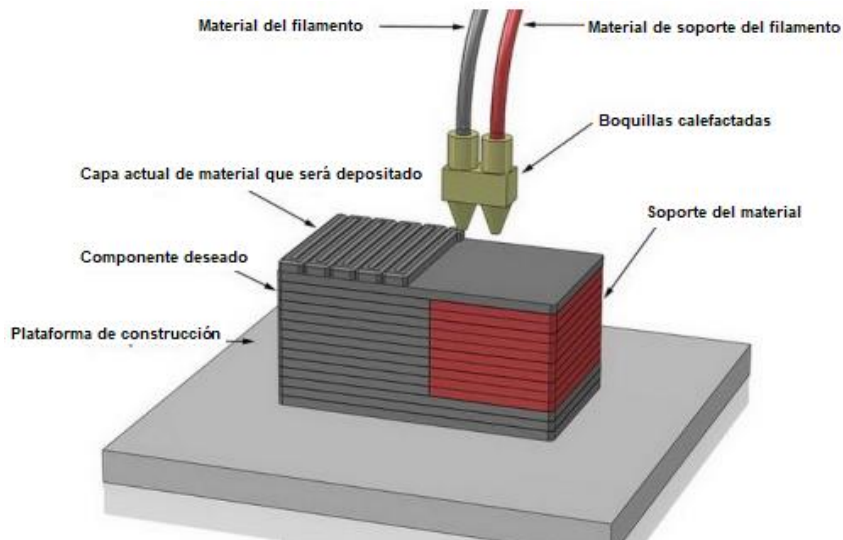


Figura 15. Deposición por capas FDM. [27]

### 2.4.2 Velocidad de impresión

Se determina en función a la velocidad con la que el extrusor y cabezal de la impresora se desplazan para expulsar el material de aporte [7]. Según Titusunta & Yanchapaxi, [2], la velocidad de impresión para los filamentos termoplásticos PET, PLA y ABS oscila en un rango de 20 a 150 mm/s relacionando directamente a la producción de rebabas a una mayor velocidad debido a la menor adhesión entre capas siendo este parámetro editable al inicio y para el final de la impresión en acabados estimar una velocidad entre 40 y 100 mm/s [28]. En base a resultados obtenidos han tabulado propiedades en función a la velocidad de manufactura para el filamento termoplástico PLA.

Tabla 6. Propiedades de especímenes PLA impresos bajo varias velocidades de impresión [28]

<b>Velocidad (mm/s)</b>	<b>30</b>	<b>60</b>	<b>90</b>	<b>120</b>
<b>Error relativo <math>\epsilon</math></b>	0.018	0.011	0.024	0.052
<b>Rugosidad (<math>\mu\text{m}</math>)</b>	8.7	5.2	6.7	7.9
<b>Densidad (<math>\text{kg/m}^3</math>)</b>	1180	1160	1050	850
<b>Esfuerzo de tensión <math>\sigma</math> (MPa)</b>	53.3	51.7	47.2	45.5

### 2.4.3 Densidad de relleno

Define como el porcentaje de relleno de una pieza impresa. aseguran que a mayor porcentaje de relleno el objeto impreso incrementara sus propiedades mecánicas, así como su tiempo de producción ya que la pieza incorporara más material haciéndola más sólida dicho porcentaje puede variar en rangos del 20% partiendo de 0 al 100% [25].

Dentro de las proporcionalidades que relacionan la densidad de relleno, también especifica la proporcionalidad directa del módulo de elasticidad como se puede observar en las figuras 16.

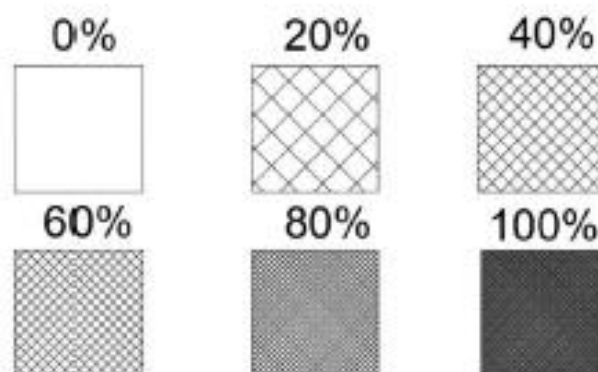


Figura 16. Porcentajes de relleno. [7]

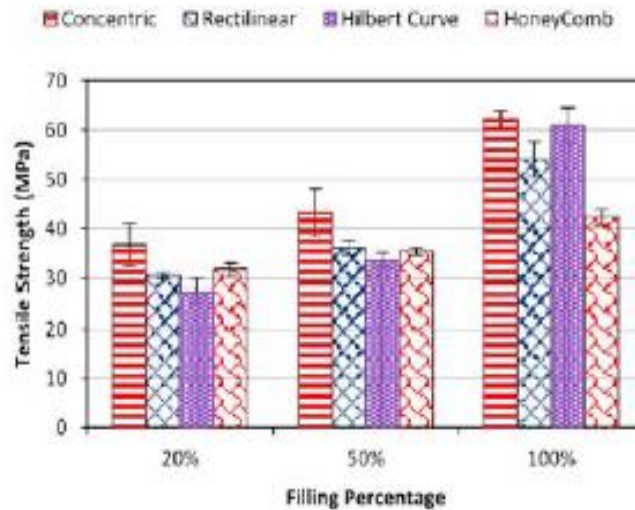


Figura 17. Resistencia a la tracción vs porcentaje de relleno. [29]

#### 2.4.4 Patrón de relleno

Lo determina como la geometría interior con la que una pieza impresa puede ser rellena en todas sus capas exceptuando las exteriores, analiza la importancia de la impresión por patrón de relleno con el objeto de minimizar desperdicios para el relleno de piezas solidas dentro de los cuales clasifica a tres patrones como la más eficiente, así mismo dentro de la clasificación que se presentan en el software de procesamiento Simplify 3D [25].

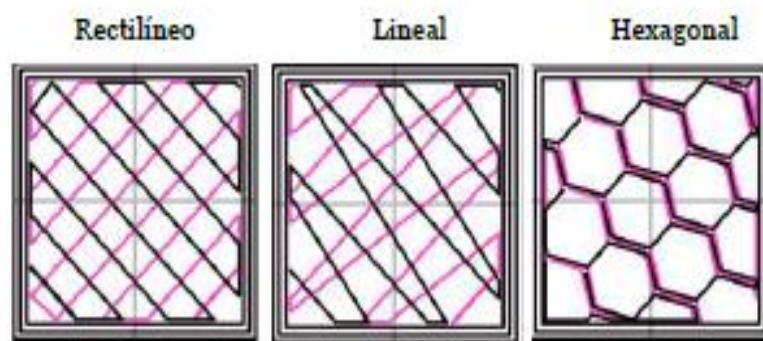


Figura 18. Patrones de relleno. [17]

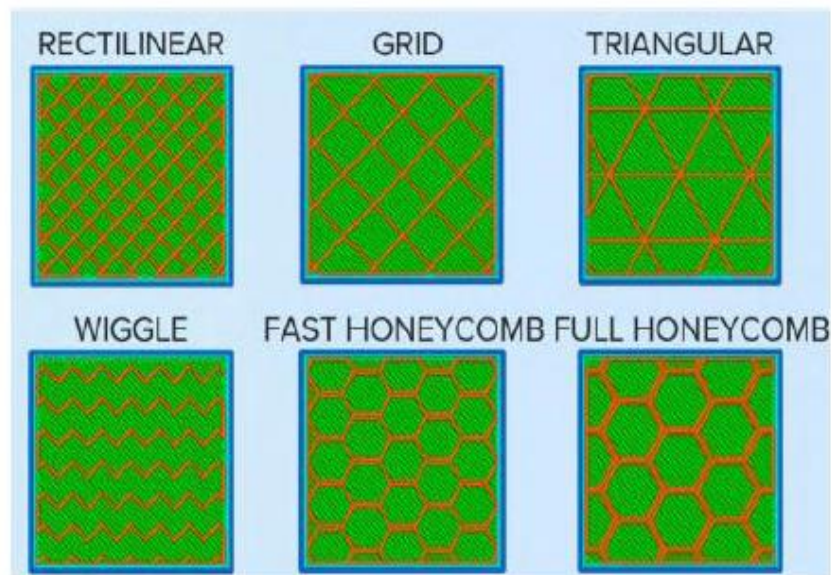


Figura 19. Patrones de relleno software Simplify 3D. [2]

#### 2.4.4.1 Tipos de patrón de relleno

- Rectilíneo, su funcionalidad lo hace el patrón más eficiente respecto a velocidad garantizando una impresión proporcional respecto al costo beneficio y la rigidez del producto final obtenida [Diseño Impresión Objetos 3d], su enfoque en particular se utiliza para la impresión de objetos con simple geometría [30].
- Lineal o Rejilla, lo ubica como uno de los más utilizados por su reducido costo en función a que el cabezal requiere menos desplazamientos la rigidez con relación al rectilíneo es ligeramente menor [30]
- Triangular, refiere al patrón de impresión directamente con el incremento de resistencia que el mismo genera en las zonas exteriores del elemento, el procedimiento conlleva más tiempo en la impresión por el tipo de desplazamiento del cabezal dentro del proceso [30]
- Ondulatorio específicamente utilizado en la producción de elementos flexibles sometidos a fuerzas torsionales o de compresión donde el desplazamiento del cabezal se genera en forma ondulatoria [30]
- Hexagonal o Panal de Abeja, se refiere el patrón es el más adecuado en la relación calidad costo por su bajo desperdicio de material de aporte la duración en el proceso de impresión es mayor respecto a los anteriores por la combinación de desplazamientos que realiza el cabezal de impresión en la que

se puede notar como el tipo de variación porcentual puede afectar el consumo de material variando la rigidez del producto final [31].

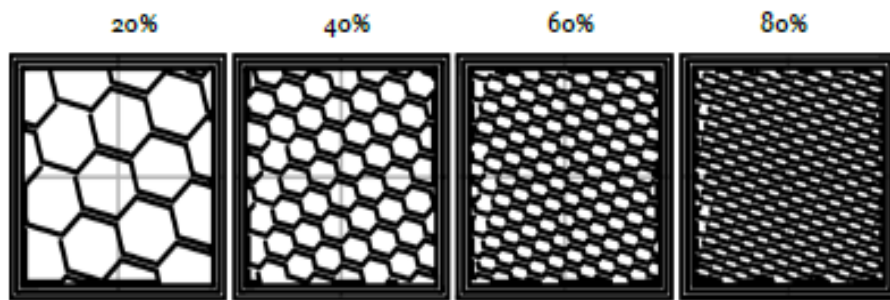


Figura 20. Variación porcentaje de relleno patrón hexagonal. [31]

Dentro de la clasificación Titusunta & Yanchapaxi [2], especifica la variación de patrones de panal de abeja subdividiéndolos en:

- Rápido. Donde la transición del cabezal se incrementa reduciendo el tiempo de impresión y garantizando una alta resistencia gracias al desplazamiento en todas las direcciones.
- Completo. Utilizado en aplicaciones donde se requiera la máxima resistencia mecánica en todo el elemento siendo la que más tiempo tarda en completar la impresión respecto a los demás patrones de relleno.

En la siguiente tabla se plantea ciertos patrones aconsejables en función a la relación de la densidad de relleno y la funcionalidad de la pieza a imprimir [32].

Tabla 7. Patrones y densidades de relleno en función a la pieza. [32]

<b>Tipo de pieza</b>	<b>Porcentaje relleno (%)</b>	<b>Tipo de patrón</b>
Piezas estéticas	10 - 20	Rectilíneo
Piezas genéricas	20 - 30	Rectilíneo
Piezas grandes que vayan a resistir fuerzas mecánicas	50	Panal de abeja
Piezas pequeñas que vayan a resistir fuerzas mecánicas	100	Rectilíneo

### 2.4.5 Temperatura de impresión

Titusunta & Yanchapaxi [2], explica la importancia del control térmico de los elementos involucrados dentro del proceso de impresión en donde el material de aporte requiere un ambiente controlado para optimizar los resultados dentro del proceso de manufactura, dentro de los parámetros a tomar en cuenta detalla la temperatura de la cama de impresión así como la atmosfera en donde se realizara el proceso, en la Tabla 8 se estima dichos parámetros para distintos tipos de materiales termoplásticos.

Además, Reinoso [7], confirma que la temperatura de impresión se relaciona directamente con el extrusor que bajo un ambiente controlado garantizara el control de las características estructurales a fin de que el producto final sea el diseñado y que el mismo cumpla con todas las propiedades deseadas.

Tabla 8. Temperaturas de filamentos en impresión 3d con técnica FDM [2]

<b>Material</b>	<b>Temperatura de fusión (°C)</b>	<b>Temperatura de cama (°C)</b>
ABS	215 – 250	90 – 130
PLA	180 – 220	25 – 60
PVA	180 – 200	50
HIPS	215 – 250	90 – 130
PET	210 – 255	55
Nylon	235 – 270	60 – 80

### 2.4.6 Orientación del modelo

Titusunta & Yanchapaxi [2], Afirma la importancia de la ubicación y orientación en el proceso de impresión 3D donde afirma que las propiedades mecánicas alcanzan un módulo de flexión máximo al encontrarse en una orientación de 90°, como se muestra en la figura 20

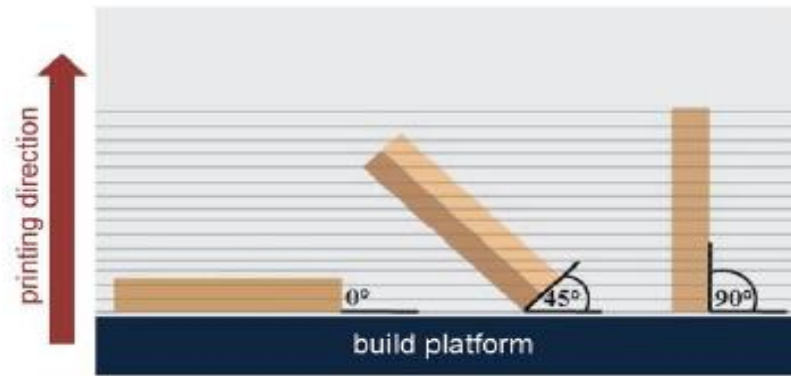


Figura 21. Orientación de la impresión de probetas para un ensayo mecánico de flexión. [2]



### **CAPÍTULO III**

#### **ANÁLISIS DE RESULTADOS EXPERIMENTALES**

##### **3.1 Análisis de las normas bajo las cuales se someten los distintos tipos de ensayos mecánicos.**

Norma ASTM D638 – 14 la norma tiene como objetivo generar datos para controlar y regular las propiedades de tracción de los materiales plásticos [33]. El método incluye los siguientes pasos:

- Medir el ancho y grosor de cada probeta en el centro y dentro de los 5 mm de cada extremo de la longitud calibrada.
- Colocar la probeta en los agarres de la máquina de ensayo, teniendo en cuenta la alineación de la probeta con los agarres. La distancia entre los extremos de la superficie de agarre es de 115 mm.
- Agregar las dimensiones de la probeta en el software R Controller, como: longitud inicial (165 mm), ancho de la sección estrecha (13 mm) y espesor (3,2 mm).
- Ubicar el extensómetro, dentro de toda la longitud calibrada de 50 mm.
- En la interfaz máquina-computador, fijar la velocidad de 5 mm/ min, la cual se aplicará durante todo el ensayo de tracción.
- Iniciar el ensayo a tracción.
- Registrar la curva carga-alargamiento de la probeta ensayada.
- Registrar la carga y el alargamiento en el punto de fluencia (si existe). Al igual que la carga y el alargamiento en el momento de la ruptura [7, p. 33].

Por otro lado, la norma establece un método de prueba para determinar las propiedades de tracción de plásticos reforzados y no reforzados en forma de probetas estándar bajo ciertas condiciones (acondicionamiento, temperatura, humedad y velocidad de prueba). A través de este método, se pueden obtener datos de rendimiento de tracción para el control y especificación de materiales plásticos, caracterización cualitativa, investigación, desarrollo, y propósitos de diseño de ingeniería plástica.

Este método de prueba es adecuado para probar materiales con un espesor de hasta 14 mm [34].

Norma ASTM D695 – 15 este estándar especifica la terminología utilizada en la determinación del tamaño de la herramienta los métodos de prueba para las propiedades del conjunto de compresión del polímero como: características de la muestra, número de muestras, velocidad de prueba, proceso, cálculo e informe de resultados [35]. El método incluye los siguientes pasos:

- a. Medir el ancho y grosor (o diámetro) de la muestra en varios puntos a lo largo de la longitud.
- b. Calcular el valor mínimo del área de la sección transversal y medir la longitud de la probeta.
- c. Añadir las dimensiones de la probeta en el software R Controller, como: longitud inicial (25,4 mm) y diámetro (12,7 mm).
- d. Colocar la probeta entre las superficies de la herramienta de compresión, teniendo cuidado con la alineación de la probeta.
- e. Con el propósito de obtener la resistencia a la compresión o el límite elástico compresivo: fijar la velocidad en 1,3 mm/min y registrar la carga máxima soportada por la probeta y permitir que la máquina trabaje a esa velocidad hasta que la probeta se fracture. [7, p. 36]

Titusunta & Yanchapaxi [2], la norma ASTM D2256 establece un método para obtener las propiedades de tensión de los componentes termoplásticos en estado de suministro, así como características estándar del filamento El método incluye los siguientes pasos:

- a. Verificar integridad de la muestra a ensayar.
- b. Del rollo de filamento seleccionado tomar más de tres muestras del filamento con marcas de longitud efectiva de  $250 \pm 3$  mm y longitud total de 500 mm.
- c. Establecer el funcionamiento de la máquina que produzca la rotura en un tiempo de  $20 \pm 3$  s.
- d. Evite cualquier cambio en la torsión o estiramiento del filamento, o ambos, durante el ensayo.

- e. Asegure un extremo de la muestra en una de las abrazaderas de la máquina de prueba de tensión.
- f. Coloque el otro extremo en la otra abrazadera, aplicando una tensión previa que se considere satisfactoria para eliminar cualquier holgura o torceduras de la mayoría de los especímenes de filamento PLA sin apreciable extensión.
- g. Encender la máquina universal TESTRESOURCES y la computadora para controlar y obtener los resultados
- h. Colocar los parámetros apropiados para el ensayo en el software respectivo de la máquina.
- i. Ensayar con la máquina de tracción hasta la rotura de cada muestra.
- j. Mida el alargamiento producido y la fuerza ejercida sobre el filamento para lograr registrar estos valores con mínimo 3 cifras significativas.
- k. Guardar datos para realizar el estudio de resultados [2, p. 45].

Norma ASTM D790 – 17 estudia el comportamiento de plásticos reforzados y no reforzados para determinar la resistencia a la flexión, el módulo de flexión y otros aspectos de la relación de extensión vs deformación por flexión.

También incluye materiales compuestos de alto módulo, formas de varillas rectangulares formadas directamente o materiales aislantes cortados de láminas o piezas moldeadas. Estas pruebas son generalmente aplicables a materiales rígidos y semirrígidos [36, p. 43]. El método incluye los siguientes pasos:

- a. Trazar la geometría respectiva por la norma D790 – 17 en el software especializado tipo CAD en módulo 3D.
- b. Exportar el sólido creado con extensión litografía (.STL) para comenzar a dibujar en el software especializado para Impresión 3D.
- c. Configurar la interfaz del software para editar el proceso con las diferentes variables de control.
- d. Ingresar las propiedades como se requiere en la Tabla 7.
- e. Verificar el tiempo de impresión y la cantidad de material a utilizar.
- f. Generar código G para importar a la Impresora CoLiDo 3D X3045.
- g. Colocar el carrete de Filamento PLA en la sección correspondiente de la impresora, así como suministrar el filamento hacia la boquilla.

- h. Encender la Impresora CoLiDo 3D X3045 y proceder con la calibración de altura entre la mesa y la boquilla, utilizar una galga de calibración que generalmente mide la mitad del diámetro de la boquilla.
- i. Establecer la configuración correspondiente a pie de máquina.
- j. Fabricar la probeta con el control visual del proceso.
- k. Retirar los modelos requeridos y limpiar la mesa de impresión.

Norma ASTM E143 cubre la prueba del módulo de corte a temperatura ambiente. Es una prueba de torsión, generalmente utilizada para determinar las propiedades básicas de los materiales. El ensayo examina la región elástica de deformación torsional, y los resultados que se buscan obtener en el ensayo de torsión con esta norma son: el momento de torsor aplicado y el ángulo de torsión para determinar el módulo de corte. La norma menciona que el ensayo debe realizarse a una temperatura ambiente de  $10^{\circ}\text{C}$  a  $35^{\circ}\text{C}$ , y el aumento de temperatura durante el ensayo debe ser mínimo para evitar deformaciones térmicas, por lo que el daño de la muestra es provocado por la aplicación de esfuerzo de torsión [37]. La norma no especifica el dimensionamiento de probetas para el ensayo, por lo que esta geometría es dependiente del equipo a utilizar. El método incluye los siguientes pasos:

- a. Trazar la geometría apropiada para la obtención de resultados de torsión en el software especializado AutoCAD en módulo 3D.
- b. Exportar el sólido creado con extensión litografía (.STL) para comenzar a dibujar en el software especializado para Impresión 3D.
- c. Configurar la interfaz del software para editar el proceso con las diferentes variables de control.
- d. Verificar el tiempo de impresión y la cantidad de material a utilizar.
- e. Generar código G para importar a la Impresora CoLiDo 3D X3045.
- f. Colocar el carrete de Filamento PLA en la sección correspondiente de la impresora, así como suministrar el filamento hacia la boquilla.
- g. Encender la Impresora CoLiDo 3D X3045 y proceder con la calibración.
- h. Establecer la configuración correspondiente a pie de máquina.
- i. Fabricar la probeta con el control visual del proceso.
- j. Retirar los modelos requeridos y limpiar la mesa de impresión [37].

### 3.2 Obtención de datos para el estudio estadístico

Análisis de que datos necesarios para realizar en estudio estadístico en base a la información obtenida dentro del software para impresión 3D simplyfy [2, p. 48], la tabla 9 compila y estructura el conjunto de datos involucrados en el proceso de fabricación de las probetas a ensayar en mismo que fue planteado como modelo base para el estudio en el proyecto.

Tabla 9. Parámetros de configuración para Impresión 3D de probetas para ensayo

<b>Parámetros</b>		
	<b>Ensayo de Flexión</b>	<b>Ensayo de Torsión</b>
<b>Extrusor</b>	Número de herramienta: Tool 1 Diámetro: 0.40 mm	
<b>Orientación</b>	Eje longitudinal paralelo al plano XY	
<b>Capas</b>	Altura de capa primaria: 0.2 mm Capas solidas superior, inferior y de coraza: 2 Velocidad de la primera capa: 40% Patrón de relleno interno: "Full Honeycomb"	Patrón de relleno interno: "Grid"
<b>Relleno</b>	Patrón externo: Rectilíneo Porcentaje de relleno: 50 % Ángulo de relleno interno: 120 y -120 ° Ángulo de relleno externo: 45 y -45 °	Patrón externo: Concéntrico Porcentaje de relleno: 50 % Ángulo de relleno interno: 45 y -45 ° Ángulo de relleno externo: 45 y -45 °
<b>Soporte</b>	Sin soporte	Con soporte puntos medios
<b>Temperatura</b>	Punto de ajuste por capa: 210 °C	
<b>Velocidad</b>	Velocidad de impresión establecida: 30 mm/s Velocidad de movimiento XY: 150 mm/s Velocidad de movimiento Z: 30 mm/s	
<b>Otros</b>	Diámetro del filamento: 1.75 mm Precio del filamento: 27 USD/kg	

Tabla de parámetros de configuración para Impresión 3D.

Elaborado por: Echeverría Eddy

### **3.3 Procedimiento para la realización de ensayos mecánicos**

#### **3.3.1 Esquematización para la realización de ensayo a flexión**

De acuerdo con la norma ASTM D790 del material base, se realizaron ocho probetas mediante fabricación aditiva para ensayo de flexión para obtener el valor de referencia Según Titusunta & Yanchapaxi [2], los pasos para la realización del ensayo bajo flexión son:

- Determinar la longitud de la probeta a ensayar.
- Ajustar los puntos de soporte del espécimen a ensayar, asegurando que no exista deslizamiento entre los puntos de sujeción y la probeta.
- Ingresar los parámetros iniciales en el equipo.
- Iniciar el ensayo de flexión.
- Realizar la toma de datos mientras se desarrolla el ensayo hasta que se produzca la falla.
- Observar la deformación del material.
- Analizar los datos obtenidos.

Los resultados que se obtiene del ensayo de flexión son:

- El módulo de rigidez o módulo de elasticidad cortante  $G$  promedio.
- Esfuerzo máximo de flexión.
- Carga máxima.

#### **3.3.2 Esquematización para la realización de ensayo a torsión**

De acuerdo con la norma ASTM 143 del material base, se realizaron cinco probetas mediante fabricación aditiva para ensayo de flexión para obtener el valor de referencia según Titusunta & Yanchapaxi [2] y Machado & Tasigchana [15], el procedimiento general para el ensayo de torsión se detalla a continuación:

- Medir el diámetro y la longitud de la probeta a ensayar.
- Sujetar y ajustar los extremos del espécimen a ensayar con las mordazas del equipo, asegurando que no exista deslizamiento entre estas y la probeta.
- Ingresar los parámetros iniciales en el equipo.
- Iniciar el ensayo de torsión.
- Realizar la toma de datos mientras se desarrolla el ensayo hasta que se produzca la falla.
- Observar la deformación del material.
- Analizar los datos obtenidos.

Los resultados que se obtiene del ensayo de torsión son:

- El módulo de rigidez o módulo de elasticidad cortante  $G$  promedio.
- Gráfica Par de torsión vs Ángulo de giro  $T$  vs  $\phi$ .
- Gráfica Esfuerzo vs Deformación a cortante  $\tau$  vs  $\gamma$

### **3.4 Análisis y descripción del comportamiento de los elementos sometidos a las cargas**

Según Titusunta & Yanchapaxi [2, p. 45], las propiedades del filamento se encuentran sometidas bajo la norma ASTM D2256 en base a los siguientes procedimientos:

- Verificar integridad de la muestra a ensayar.
- Del rollo de filamento seleccionado tomar más de tres muestras del filamento con marcas de longitud efectiva de  $250 \pm 3$  mm y longitud total de 500 mm. 45
- Establecer el funcionamiento de la máquina que produzca la rotura en un tiempo de  $20 \pm 3$  s.
- Asegure un extremo de la muestra en una de las abrazaderas de la máquina de prueba de tensión
- Coloque el otro extremo en la otra abrazadera, aplicando una tensión previa que se considere satisfactoria para eliminar cualquier holgura o torceduras de la mayoría de los especímenes de filamento PLA sin apreciable extensión.

- Encender la máquina universal TESTRESOURCES y la computadora para controlar y obtener los resultados
- Colocar los parámetros apropiados para el ensayo en el software respectivo de la máquina.
- Ensayar con la máquina de tracción hasta la rotura de cada muestra.
- Mida el alargamiento producido y la fuerza ejercida sobre el filamento para lograr registrar estos valores con mínimo 3 cifras significativas.
- Guardar datos para realizar el estudio de resultados.



## CAPÍTULO IV

### RESULTADOS ENSAYOS

#### 4.1 Maquinaria encargada de realizar los ensayos de flexión y torsión

##### 4.1.1 Ensayo Flexión

El ensayo de flexión realizado según la norma ASTM en la máquina electromecánica de pruebas de la serie TESTRESOURCES 315 capaz de realizar los siguientes ensayos mecánicos en muestras de materiales: tracción, compresión, flexión, fractura, cizallamiento y desgarro [38].

La máquina presenta unos valores máximos de: carga, esfuerzos, módulo de elasticidad, carga a la fluencia, esfuerzo a la fluencia que se muestran en la tabla 10, los cuales serán evaluados dentro del proyecto [38].

Tabla 10. Parámetros de funcionamiento de máquina herramienta TESTRESOURCES Serie 315

Máquina ensayos TELETRESOURCES		
	Valores	Unidad
Fuerza Máxima	150	kN
Velocidad Máxima	300	mm/min
Recorrido de la cruceta	1220	mm
Espacio entre columnas	550	mm

Tabla de funcionamiento de máquina TESTRESOURCES Serie 315.  
Elaborado por: Echeverría Eddy

Los accesorios para las pruebas de flexión se proporcionan en el kit proporcionado la máquina universal. En la figura 23 se muestra el modelo de máquina proporcionado por TESTRESOURCES.



Figura 22. Máquina universal de ensayos mecánicos TESTRESOURCES. [2]

#### 4.1.2 Ensayo Torsión

El ensayo de torsión realizado en el laboratorio de la Escuela Politécnica de las Fuerzas Armadas bajo la norma ASTM, se llevó a cabo con probetas basadas en los requerimientos para su acople dentro de las mordazas y especificaciones de la maquina Avery 6609CHG [38]. En la figura 24, se puede observar las pruebas con información de la placa correspondiente.



Figura 23. Máquina ensayo torsión Avery 6609CHG. [39]

Tabla 11. Parámetros de funcionamiento de máquina herramienta  
TESTRESOURCES Serie 315

<b>Ficha técnica equipo Avery 6609CHG</b>		
Característica	Valor	Unidad
Ciclos	50	Hz
Capacidad máxima	1500	N.m
+Potencia del motor	1/2	HP
Velocidad máxima del motor	420	rpm
Velocidades disponibles	1/2,10,30,90	grados/min

Tabla de parámetros de funcionamiento de máquina herramienta TESTRESOURCES Serie 315.  
Elaborado por: Echeverría Eddy

#### **4.2 Diseño mecánico probeta dimensional y características**

Los datos obtenidos en la tabla 12, representan características mecánicas como lo son resistencia a la tracción, resistencia a la compresión así como propiedades elásticas del material proporcionado por la empresa SAIS 3D para su investigación y análisis de este material en estado de suministro, fue seleccionado por cumplir las respectivas características técnicas, las cuales serán verificadas bajo los resultados arrojados por los ensayos previstos dentro del experimento, así como su fiabilidad dentro del mercado ecuatoriano.

Tabla 12. Propiedades PLA

Propiedades mecánicas	Valor
Resistencia a la tracción (MPa)	44.2 ± 1.3
Resistencia a la flexión (MPa)	84.1 ± 2.2
Elongación a la rotura (%)	2.0 ± 0.4
Resistencia al impacto (KJ/m <sup>2</sup> )	2.8 ± 0.21
Limite elástico (MPa)	60
Módulo de Young (MPa)	3500
Módulo de Flexión (MPa)	3100 ± 220
Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	1240
Temperatura de trabajo (°C)	190 - 230
Porcentaje de elongación (%)	6.0

Tabla 13. Propiedades PLA.

Elaborado por: Echeverría Eddy

### 4.3 Descripción del software a utilizar para la simulación

El Software Simplify3D designado para la creación de elementos 3D comprende la captación y desarrollo de la disposición de distintos patrones de relleno determinados por el presente estudio el cual relaciona la información con la impresora CoLiDo X3045 para establecer parámetros en la fabricación de las respectivas probetas brindando información para la estimación de recursos necesarios dentro de la manufactura como tiempo de procesado, cantidad de material, datos relevantes al momento de estimar valores a fin de comprender el comportamiento del proceso [2, p. 58].

Simplify3D posee la capacidad de correlacionar distintos tipos de software para impresoras 3D dando la posibilidad de la configuración desde un mando central capaz de cambiar y modificar los parámetros bajo los cuales se dará paso a la creación de elementos gracias a su simulación de pre impresión se es capaz de visualizar el diseño detallando la información de velocidades secuencias y configuraciones relevantes al momento de ejecutar el proceso [40].

#### 4.3.1 Pasos para la impresión en base al software

- En primer lugar, se diseña las probetas en Autodesk Professional Inventor 2020.
- En segundo lugar, se convierte el archivo de extensión .dwg a .stl para poder utilizar el software Simplify 3D.
- En tercer lugar, se carga el cartucho de filamento a la impresora.
- Acto seguido se encendió el programa Simplify 3D y la impresora para modificar los parámetros de impresión. Luego de establecidos los parámetros, se adhiere una cinta adhesiva de papel a la cama caliente de la impresora para evitar que el componente se dañe a la hora de retirarlo.
- A continuación, se da la orden de empezar el precalentamiento del extrusor y de la cama caliente, la temperatura de trabajo se estableció a 230°C y 110°C respectivamente. Inmediatamente después de alcanzar la temperatura establecida se ejecutó el programa para comenzar la impresión de las probetas.
- La impresora tarda entre 6 y 9 minutos para imprimir cada probeta. Finalmente, se inspecciona, registra y almacena cada probeta [7, p. 37].

#### 4.3.2 Parámetros de configuración para Impresión 3D de las probetas

Tabla 14. Parámetros utilizados en la fabricación de probetas de flexión

Parámetros	Valor
Probetas densidad 50 %	8
Temperatura de extrusor, °C	210
Temperatura de cama, °C	65
Velocidad de impresión, m/s	0.03
Peso propuesto simulado probetas de densidad 50 %, gr	23.48
Longitud necesaria de filamento de PLA para impresión probetas (m)	7.81
Tiempo simulado para impresión de probetas al 50 % (h; min)	2; 33

Tabla de parámetros utilizados en la fabricación de probetas de flexión.  
Elaborado por: Echeverría Eddy

Tabla 15. Parámetros utilizados en la fabricación de probetas de torsión

Parámetros	Valor
Probetas densidad 50 %	5
Temperatura de extrusor, °C	210
Temperatura de cama, °C	80
Velocidad de impresión, m/s	0.07
Peso propuesto simulado probetas de densidad 50 %, gr	135.92
Longitud necesaria de filamento de PLA para impresión probetas (m)	45.22
Tiempo simulado para impresión de probetas al 50 % (h; min)	6; 26

Tabla de parámetros utilizados en la fabricación de probetas de torsión.

Elaborado por: Echeverría Eddy

#### 4.4 Estudio de las propiedades del material proporcionado y del diseño generado en CAD

La norma D790 – 17 indica que las dimensiones para las probetas de flexión son de 127 x 12.7 x 3.2 mm de longitud, ancho y espesor respectivamente. En la Figura 22 se muestra el diseño de la probeta [2, p. 46].

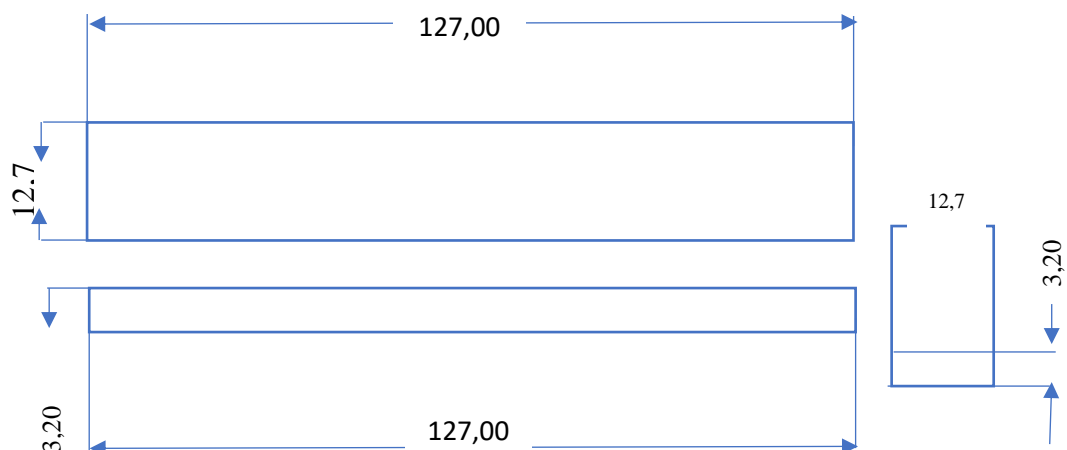


Figura 24. Dimensiones y geometría de las probetas para ensayo de flexión.

Elaborado por: Echeverría Eddy

Metodología para la elaboración de las probetas de flexión con tecnología de Impresión 3D:

- Trazar la geometría respectiva por la norma D790 – 17 en el software especializado tipo CAD en módulo 3D.
- Exportar el sólido creado con extensión litografía (.STL) para comenzar a dibujar en el software especializado para Impresión 3D.
- Configurar la interfaz del software para editar el proceso con las diferentes variables de control.
- Ingresar las propiedades como se requiere en las tablas anteriores a partir de las teorías de parámetros de relleno expuesto en el capítulo 1.
- Verificar el tiempo de impresión y la cantidad de material a utilizar.
- Generar código G para importar a la Impresora CoLiDo 3D X3045.
- Colocar el carrete de Filamento PLA en la sección correspondiente de la impresora, así como suministrar el filamento hacia la boquilla.
- Encender la Impresora CoLiDo 3D X3045 y proceder con la calibración de altura entre la mesa y la boquilla, utilizar una galga de calibración que generalmente mide la mitad del diámetro de la boquilla.
- Establecer la configuración correspondiente a pie de máquina.
- Fabricar la probeta con el control visual del proceso.
- Retirar los modelos requeridos y limpiar la mesa de impresión [31].

#### **4.4. Parámetros a normalizar en el ensayo flexión.**

El software de la máquina universal de ensayos genera lecturas reales medidas por el sensor de fuerza y de esta manera se logra conocer los comportamientos de las curvas de fuerza aplicada vs la posición para posteriormente realizar un tratamiento estadístico de los resultados de cada ensayo.

Tabla 16. Parámetros software ensayo flexión

Parámetros	Valor
Modelo digital del Ensayo	Beam center
Ancho (mm)	12.7
Espesor (mm)	3.2
Longitud entre soportes (mm)	51.2
Velocidad de ensayo (mm/min)	1.3
Valor máximo de fuerza aplicada (N)	5000
Tasa de muestras por segundo	50

Elaborado por: Echeverría Eddy

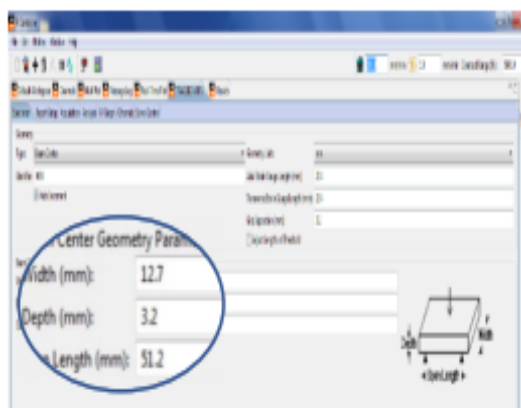


Figura 25. Parámetros de ensayo de flexión.

Elaborado por: Echeverría Eddy

La máquina universal de ensayos mecánicos TESTRESOURCES como se aprecia en la figura 27 en conjunto con la probeta a ensayar, se procede a la configuración del software para el control de la máquina tomado de la tabla 16.



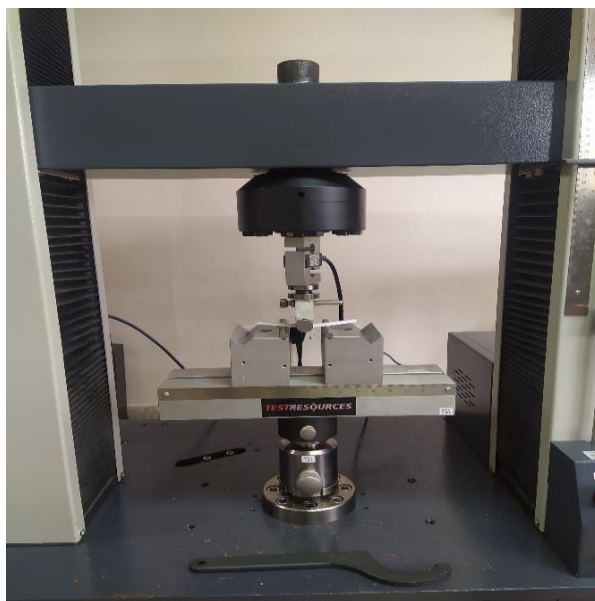


Figura 26. Posicionamiento probeta ensayo flexión.

Elaborado por: Echeverría Eddy

#### 4.5 Resultados del ensayo de flexión del filamento PLA

Tabla 17. Parámetros ensayo flexión

Probeta	Carga Máxima (N)	Esfuerzo		Elongación por Flexión (mm/mm)	Módulo de Elasticidad (MPa)
		Máximo de Flexión (MPa)	Deflexión (mm)		
<b>P1</b>	75.406	48.025	5.9	0.0536	194.963
<b>P2</b>	75.852	48.309	5.2	0.0435	1824.32
<b>P3</b>	73.549	46.842	4.1	0.0346	1924.25
<b>P4</b>	73.103	46.558	5.0	0.0334	1234.23
<b>P5</b>	71.246	45.375	7.5	0.0344	189.423
<b>P6</b>	71.691	45.659	3.1	0.0347	205.219
<b>P7</b>	70.131	25.036	3.6	0.0253	235.111
<b>P8</b>	72.360	46.085	3.2	0.0367	1755.45
<b>P9</b>	75.480	48.072	5.2	0.0532	178.837
<b>Media</b>	72.927	43.992	5.3	0.0388	202147,5

Elaborado por: Echeverría Eddy

En las Figuras 27 - 35 se presenta el conjunto de curvas que generan los ensayos de flexión sobre los diferentes especímenes. Este gráfico describe las curvas generadas a través de la relación Carga aplicada vs Posición de desplazamiento.

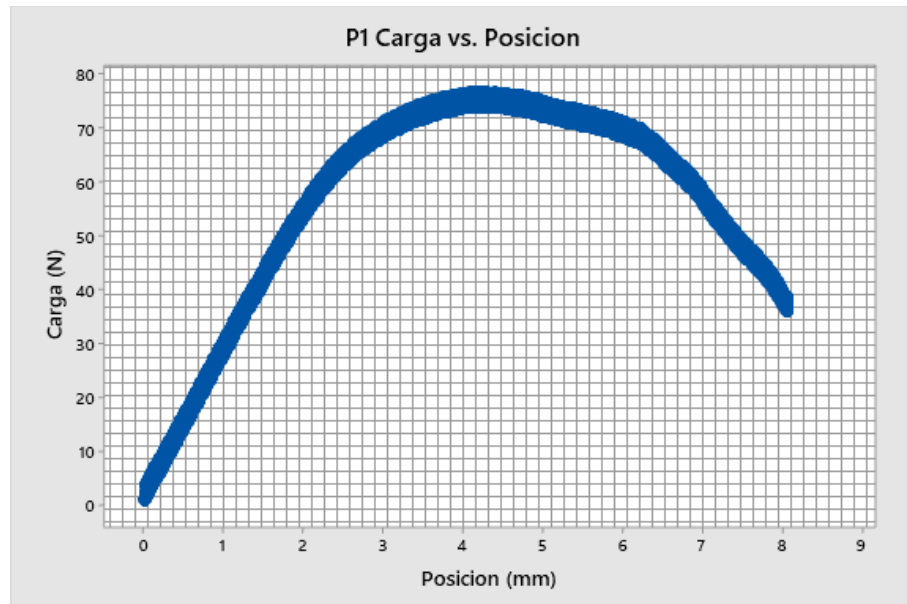


Figura 27. Ensayo flexión Probeta 1.

Elaborado por: Echeverría Eddy

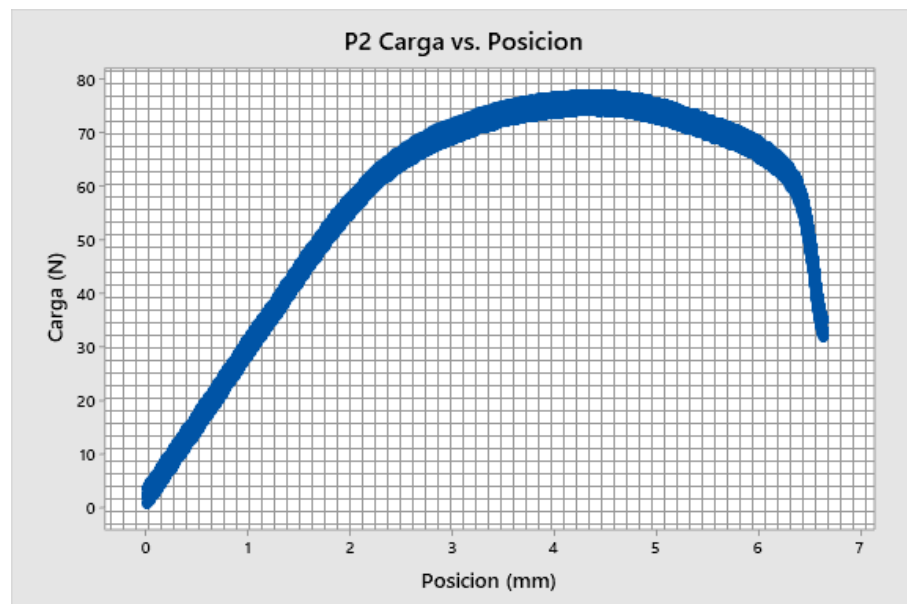


Figura 28. Ensayo flexión Probeta 2.

Elaborado por: Echeverría Eddy

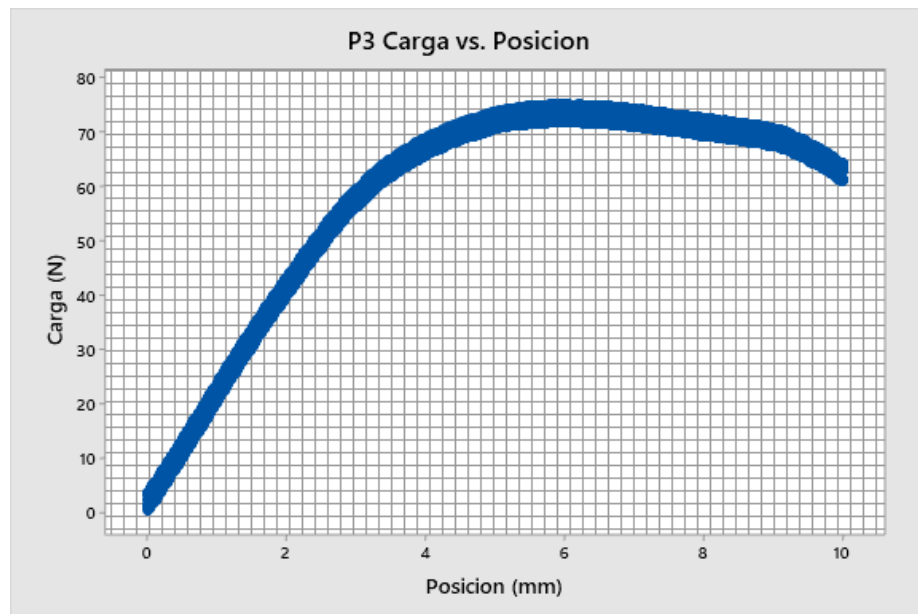


Figura 29. Ensayo flexión Probeta 3.

Elaborado por: Echeverría Eddy

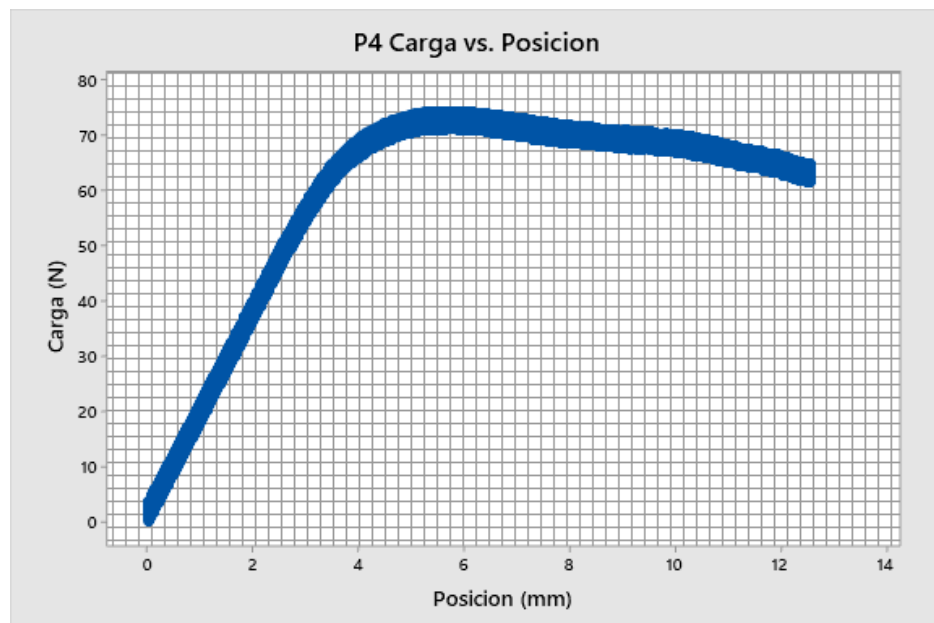


Figura 30. Ensayo flexión Probeta 4.

Elaborado por: Echeverría Eddy

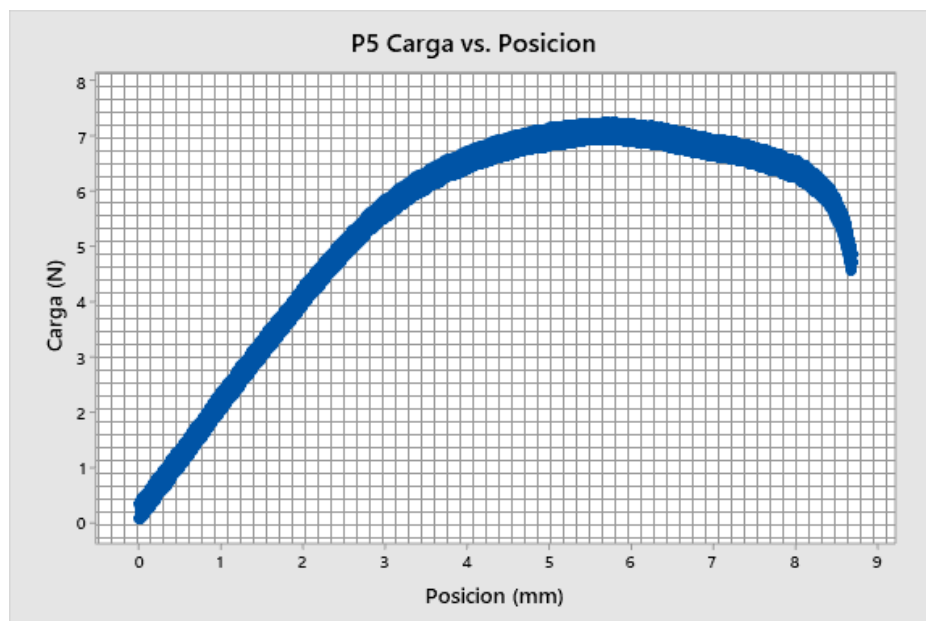


Figura 31. Ensayo flexión Probeta 5.

Elaborado por: Echeverría Eddy

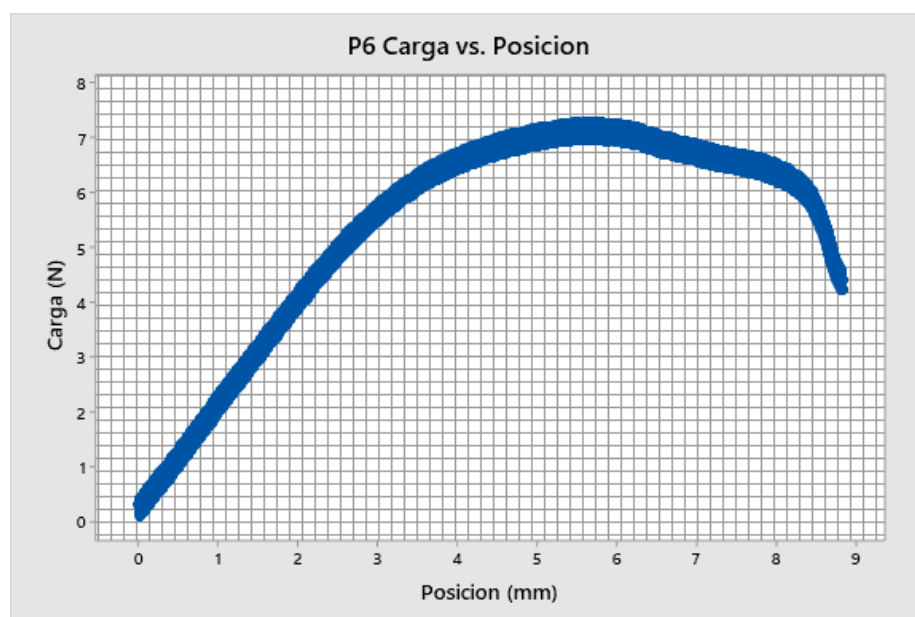


Figura 32. Ensayo flexión Probeta 6.

Elaborado por: Echeverría Eddy

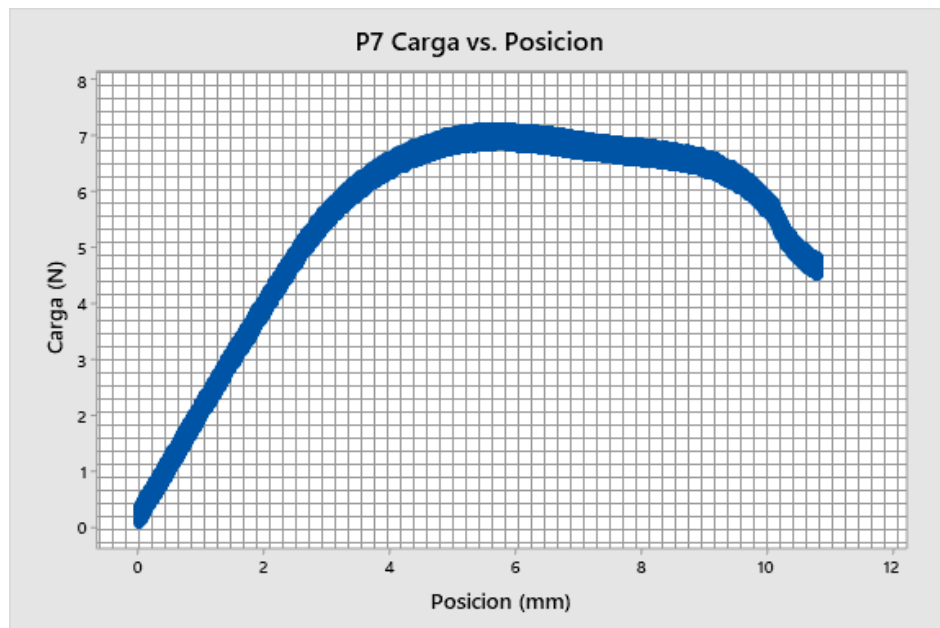


Figura 33. Ensayo flexión Probeta 7.

Elaborado por: Echeverría Eddy

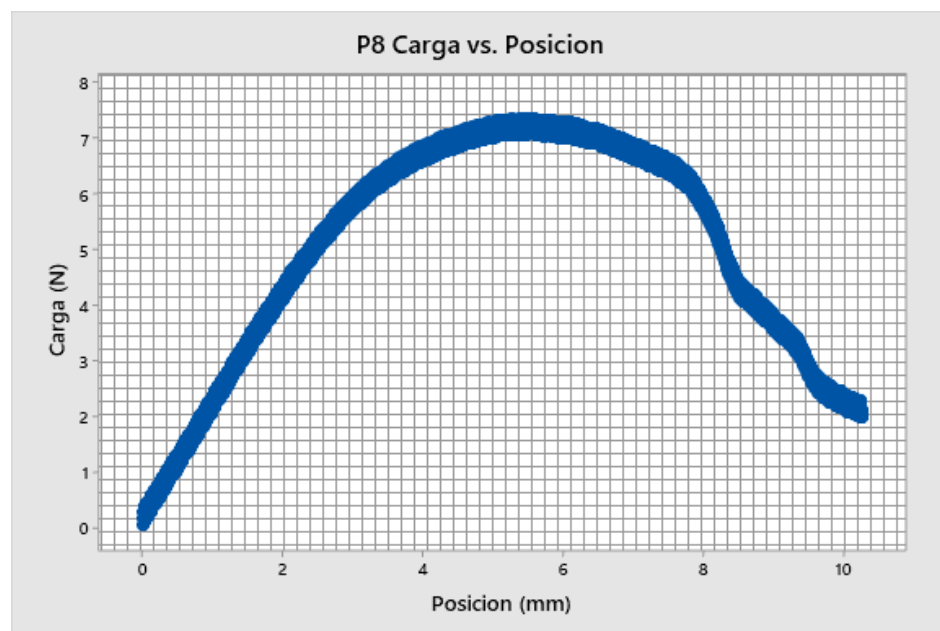


Figura 34. Ensayo flexión Probeta 8.

Elaborado por: Echeverría Eddy

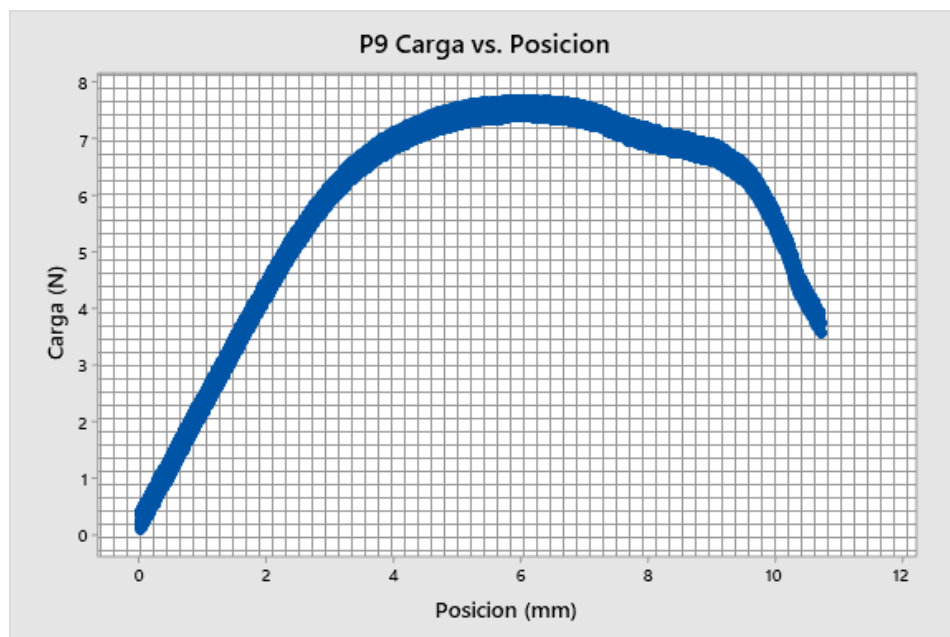


Figura 35. Ensayo flexión Probeta 9.

Elaborado por: Echeverría Eddy

La figura 36 muestra las probetas después de ser ensayadas mostrando que existe una deformación permanente con una ligera tendencia a un ángulo de  $150^\circ$  para las probetas de 50 % de densidad de relleno.



Figura 36. Ensayo flexión Probetas 1-9.

Elaborado por: Echeverría Eddy

#### **4.6 Ensayo de torsión en estado de suministro**

En base a la norma ASTM D2256 [2, p. 58], manifiesta que el filamento PLA en estado de suministro requiere que por lo menos tres especímenes ensayados cumplan los parámetros con ruptura dentro del rango efectivo

#### **4.7 Procedimiento ensayo torsión**

El ensayo de torsión se adapta a las condiciones de la máquina como se estableció previamente, por lo que en la máquina de torsión Avery se logra obtener datos correspondientes al ensayo a realizar. En la figura 38 se muestra el posicionamiento de la probeta en las mordazas de la máquina Avery para el ensayo de torsión.

Para lograr los resultados esperados se requiere de un cronómetro que permita medir el tiempo para tomar el par mostrado en la máquina y relacionarlo con el tiempo que se convertirá en ángulo de giro posteriormente. El ángulo de giro que se presenta en el ensayo se encuentra a través de la relación de velocidad constante de la máquina de torsión Avery y el tiempo tomado por el cronómetro. Con estos parámetros se logra hallar las variables a través de cálculos en base a las ecuaciones del primer capítulo seleccionada debido a la geometría de la probeta.

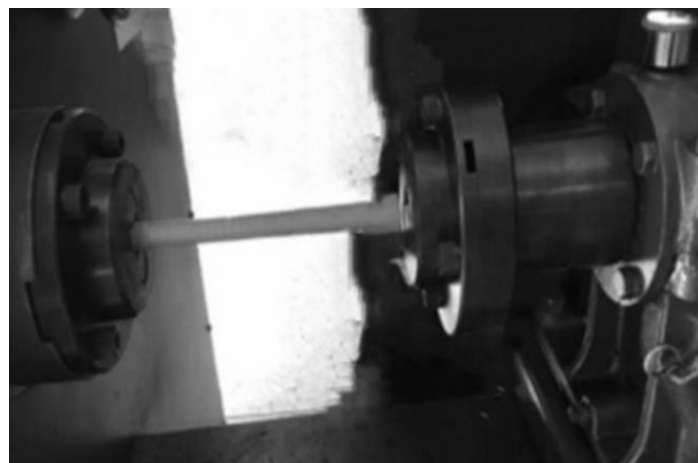


Figura 37. Ensayo torsión maquina Avery.

Elaborado por: Echeverría Eddy

#### **4.8 Resultados del ensayo de torsión del filamento PLA**

El ensayo de tracción se ha llevado a cabo según la norma ISO 527-2:2012 para la determinación de las propiedades en tracción. La máquina usada para llevar a cabo el ensayo es Avery.

Como se comentó en apartados anteriores se han realizado, para la configuración de polímeros cinco modelos de probetas con la siguiente configuración:

##### **4.8.1 Mallado panal de abeja a 45° con relleno del 50%**

La norma establece la cantidad de 5 probetas por ensayo para obtener unos resultados óptimos en cuanto a la variabilidad que puede introducir el proceso. Las dimensiones de la probeta y las razones que nos han llevado a su elección se pueden consultar en el apartado 4.4 de la presente. Se han ensayado también probetas que han sido mantenidas en agua destilada durante 48 horas. Estas probetas corresponden a PLA Natural con mallado 45° y 50 % de densidad.

En cuanto al proceso de tracción, este se realizó con una fuerza de polaridad estándar hacia arriba y los datos obtenidos se mostraban en kilo Newtons (kN) y en milímetros (mm). El límite de rango de fuerza es de 1kN y la deformación de 200 mm. La toma de datos por parte del sensor se realiza cada 100 milisegundos. En ensayo se realiza a una velocidad de 0.5 mm/min.

De este modo el ensayo no es demasiado extenso en el tiempo ni demasiado corto. La representación de los datos por parte del software se realiza en una gráfica con un máximo de 0.45 kN y 5 mm de elongación. Los parámetros antes mencionados son configurados al inicio de las pruebas y queda definido como nuestro método de ensayo, al que se recurrirá para realizar todos los test independientemente del material testado.

A continuación, en la figura 39, se puede observar la comprobación del efecto del ensayo.



Tabla 18. Parámetros ensayo torsión

<b>Probeta</b>	<b>Torque Máximo (N)</b>	<b>Angulo de Giro (rad)</b>	<b>Esfuerzo cortante (MPa)</b>	<b>Deformacion rotacional (mm/mm)</b>	<b>Módulo de Rigidez (MPa)</b>
PT1	5.406	0.710	7.66	0.0343	188.901
PT2	5.862	0.756	8.15	0.0445	194.218
PT3	5.549	0.737	7.81	0.0523	190.568
PT4	6.103	0.771	8.41	0.0461	197.028
PT5	5.246	0.719	7.49	0.0402	197.035
Media	5.633	0.739	7.90	0.0435	193.550

Elaborado por: Echeverría Eddy

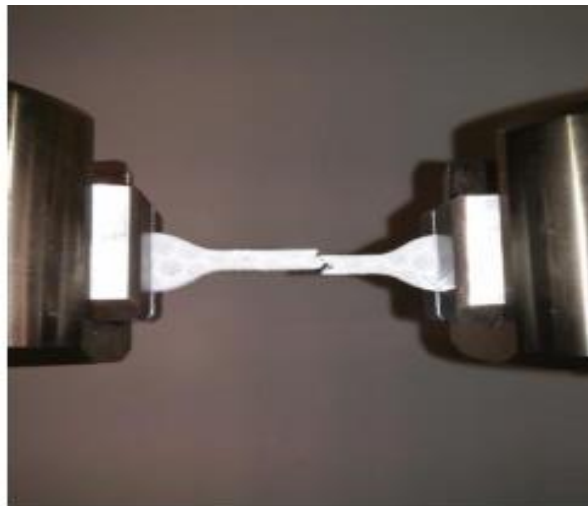


Figura 38. Detalle resultado final ensayo torsión.

Elaborado por: Echeverría Eddy

En la figura 40 se presentan en forma gráfica los datos obtenidos en el ensayo de torsión por medio de curvas que relacionan el torque vs ángulo de giro, resultados logrados por los tres ensayos de torsión para probetas de PLA impresas con densidad de relleno del 50 % las cuales en base a la normativa son aceptables para sacar resultados validos dentro del ensayo.

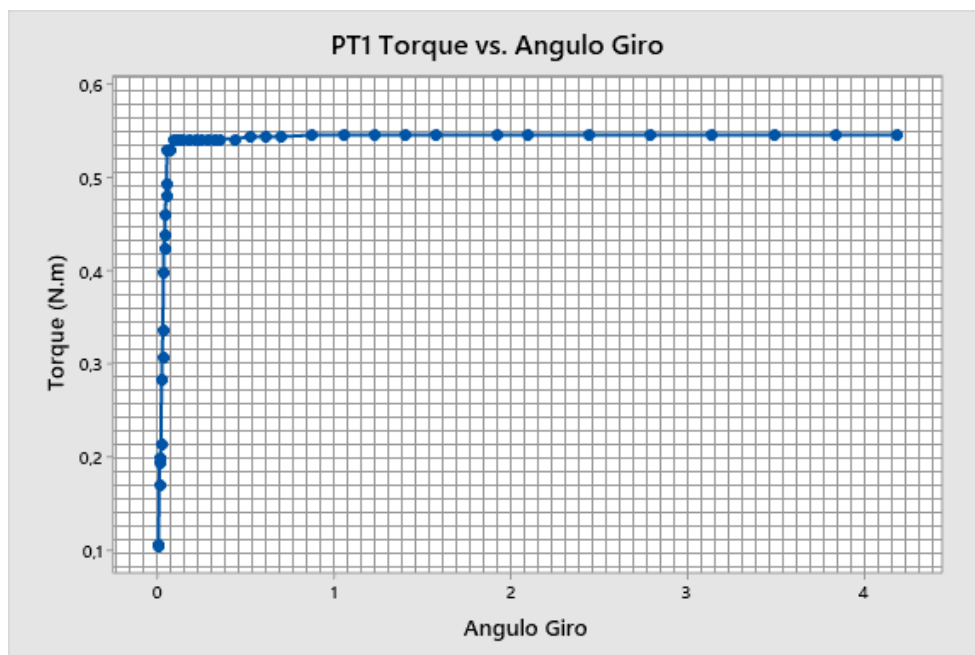


Figura 39. Grafica Torque vs Angulo de giro probetas 50% de densidad de relleno Probeta 1.  
Elaborado por: Echeverría Eddy

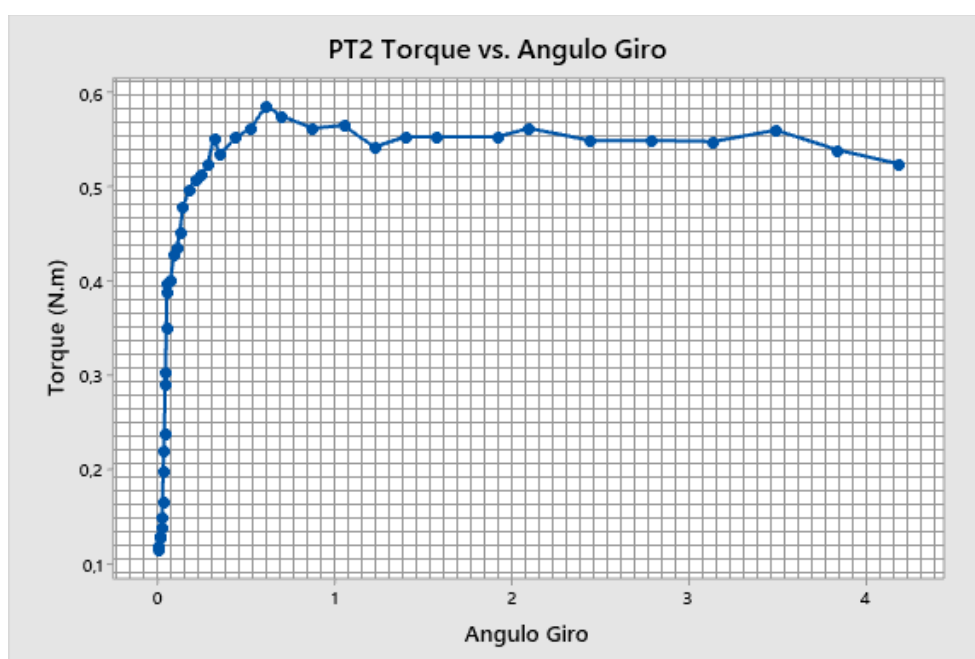


Figura 40. Grafica Torque vs Angulo de giro probetas 50% de densidad de relleno Probeta 2.  
Elaborado por: Echeverría Eddy

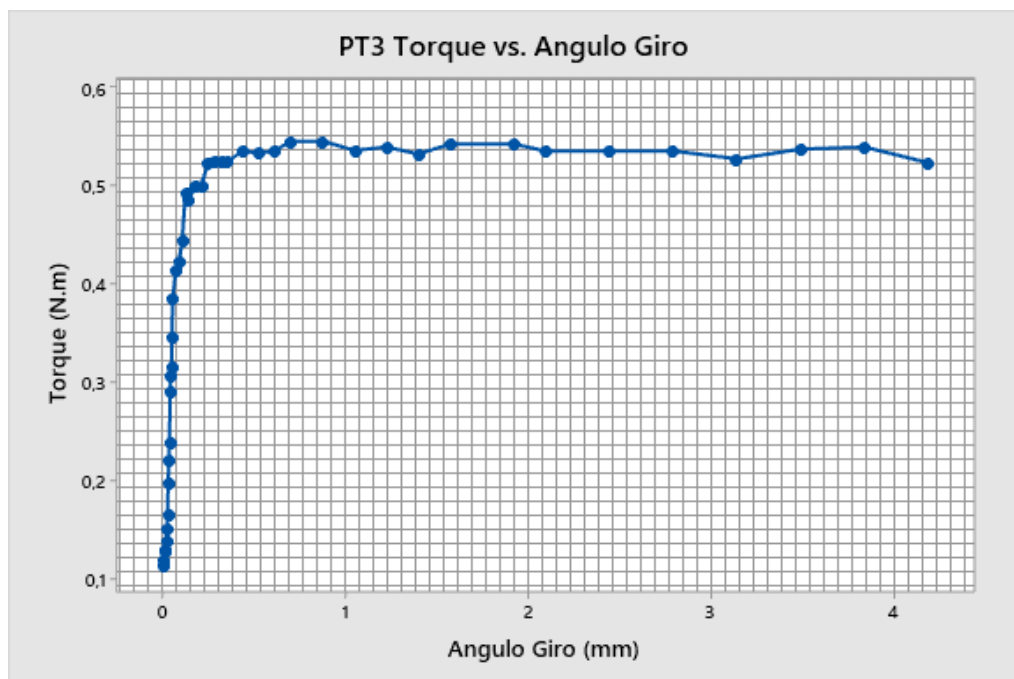


Figura 41. Grafica Torque vs Angulo de giro probetas 50% de densidad de relleno Probeta 3.

Elaborado por: Echeverría Eddy

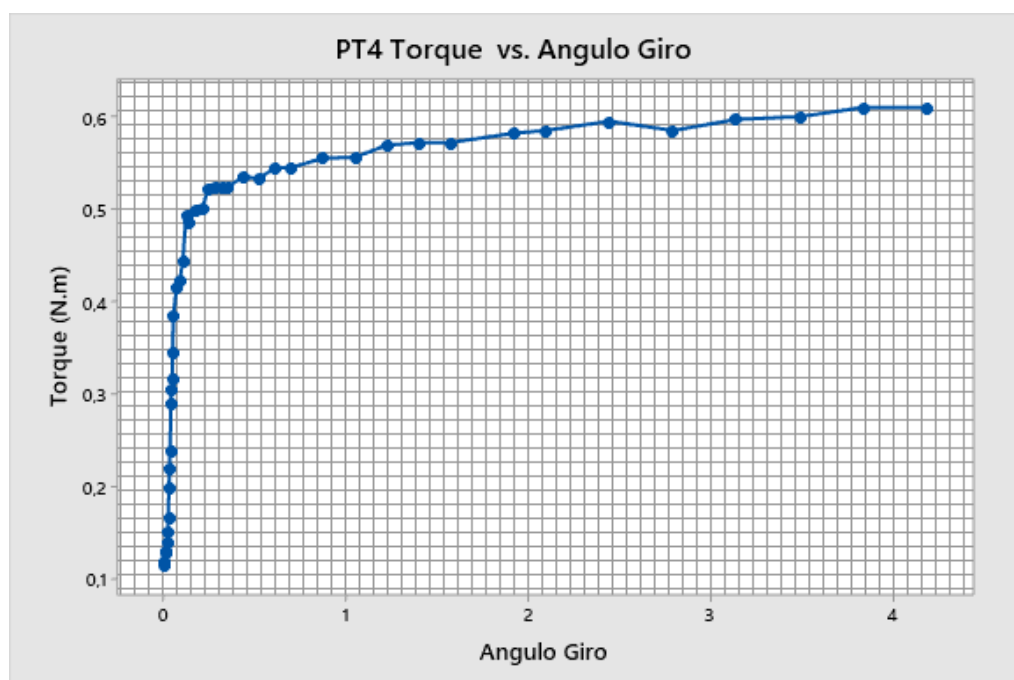


Figura 42. Grafica Torque vs Angulo de giro probetas 50% de densidad de relleno Probeta 4.

Elaborado por: Echeverría Eddy

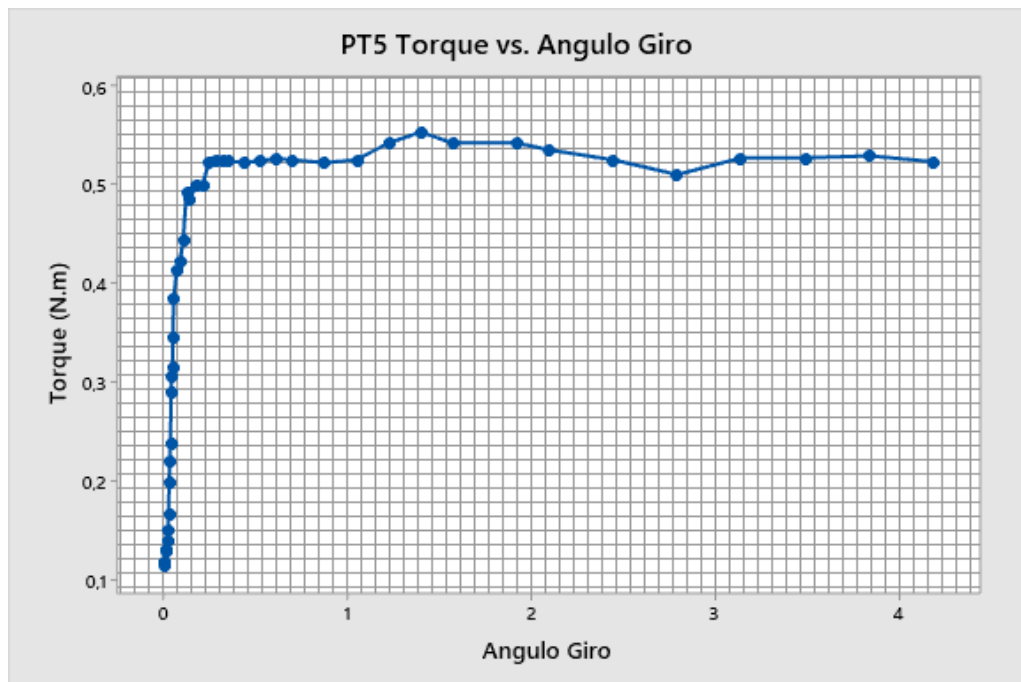


Figura 43. Grafica Torque vs Angulo de giro probetas 50% de densidad de relleno Probeta 5.

Elaborado por: Echeverría Eddy

Las propiedades mecánicas de la probeta al 50% mostraron una tendencia promedio con un par máximo de 7.586 MPa, una deformación rotacional de 0.0435 mm / mm y un módulo de rigidez de 193.550 MPa. La Figura 44 muestra un conjunto de piezas probadas y sus respectivas áreas de falla, lo que indica una ligera tendencia de deformación constante. Dado que es un representante de materiales frágiles, en este se observó que las grietas se produjeron en un ángulo entre aproximadamente 45 ° y 55°.

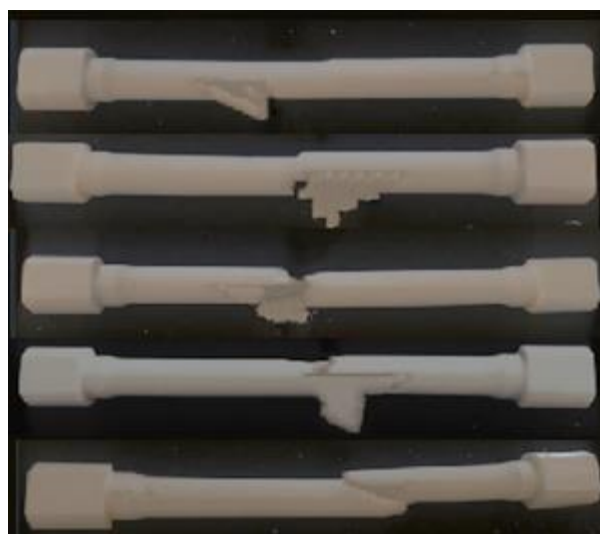


Figura 44. Ensayo torsión probetas 1-5.

## 4.9 Resolución de simulación

El software de simulación tiene diferentes módulos de aprendizaje, dependiendo de Si necesita una investigación especial, puede elegir la investigación de estructuras estáticas, Investigación dinámica, investigación térmica, investigación de vibraciones, etc.

Los módulos utilizados tienen estructuras dinámicas y estáticas porque tienen Soluciones en el campo de la ingeniería sólida. Resultado Deformación, esfuerzo, alargamiento, etc. Muestra los resultados de la tensión de flexión durante la prueba, Identifique las áreas más grandes y que menos trabajo ahorran en forma de matriz de color Relacionado con el valor de la solución AEF

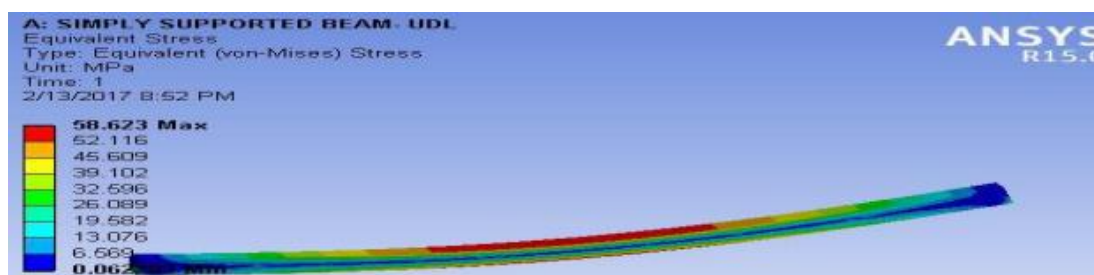


Figura 45. Ensayo de flexión en software de AEF con identificación de valores para esfuerzos resultantes.

Elaborado por: Echeverría Eddy

El proceso de experimentación requiere una metodología de fabricación y validación de resultados, debido a esto se necesita disponer de una cantidad de tiempo considerable para reconocer la viabilidad de los diseños propuestos. Los recursos informáticos CAD/CAM/CAE permiten crear flexibilidad en la manufactura y de esta manera lograr resultados eficientes para la integración de los productos en los diferentes mercados [2].

Para fines de estudio el software ANSYS 2021 en su licencia estudiantil no cuenta con la gama completa de elementos, por lo que es necesario el ingreso manual del material PLA utilizado para el análisis normalizado en la figura 46 bajo las características del fabricante.










Properties of Outline Row 73: Polylactic acid (PLA)			
	A	B	C
1	Property	Value	Unit
2	 Density	1250	kg m <sup>-3</sup>
3	 Isotropic Secant Coefficient of Thermal Expansion		
4	 Coefficient of Thermal Expansion	0.000135	C <sup>-1</sup>
5	 Isotropic Elasticity		
6	Derive from	Young's Modulus an...	
7	Young's Modulus	3.45E+09	Pa
8	Poisson's Ratio	0.39	
9	Bulk Modulus	5.2273E+09	Pa
10	Shear Modulus	1.241E+09	Pa
11	 Tensile Yield Strength	5.41E+07	Pa
12	 Tensile Ultimate Strength	5.92E+07	Pa
13	 Isotropic Thermal Conductivity	0.144	J m <sup>-1</sup> s <sup>-1</sup> C <sup>-1</sup>
14	 Specific Heat, C <sub>p</sub>	1190	J kg <sup>-1</sup> C <sup>-1</sup>
15	 Isotropic Resistivity	4.31E+09	ohm m

Figura 46. Parámetros para la creación del material PLA de forma manual.  
Elaborado por: Echeverría Eddy

#### 4.10 Método de elementos finitos para estudio estático

El método de elementos finitos o

análisis por elementos finitos (AEF) es un método numérico utilizado para la resolución de problemas de gran dificultad por medio de la discretización en elementos pequeños que se relacionan en condiciones de frontera, cargas aplicadas y geometrías específicas.

La teoría de la elasticidad es el fundamento teórico para obtener el resultado que se estudia en la configuración específica con las cargas y apoyos que simulan el comportamiento en servicio de los elementos diseñados [2].

##### 4.10.1 Creación de la geometría de los elementos a simular bajo diferentes condiciones.

A continuación, se presenta la metodología de diseño CAD para lograr obtener los modelos de los elementos estudiados en el presente proyecto técnico:

- Establecer las condiciones de fabricación mediante código G generado en el software especializado para enviar las instrucciones en la Impresión 3D.

- Visualizar las dimensiones propuestas en la figura 42 y 43.
- Crear el modelo propuesto en configuración de vaciado para ubicar posteriormente el relleno correspondiente.
- Con las dimensiones obtenidas por el código G se establece las posiciones de los diferentes puntos para realizar el relleno en cada elemento.
- Dibujar un par de patrones que se permitan replicar por medio de las operaciones de patrón lineal.
- Intersecar las operaciones creadas para ubicar el relleno dentro de los elementos huecos.
- Guardar el elemento creado en un formato de lectura para que sea interpretado en el software de simulación.

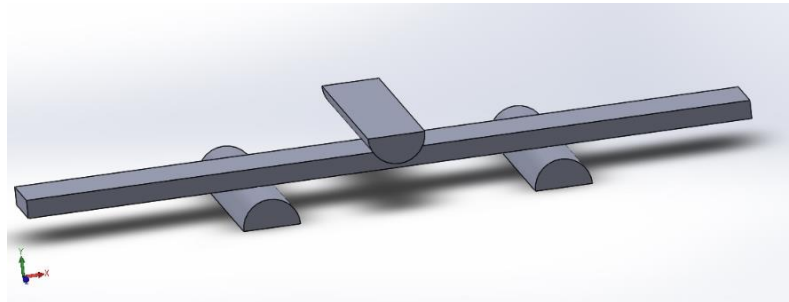


Figura 47. Vista exterior probeta 50% de densidad de relleno en configuración panal de abeja diseñada para ensayo a flexión.  
Elaborado por: Echeverría Eddy

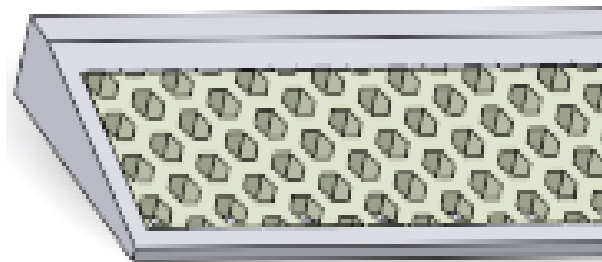


Figura 48. Vista interior Probeta 50% de densidad de relleno en configuración panal de abeja diseñada para ensayo a flexión.  
Elaborado por: Echeverría Eddy

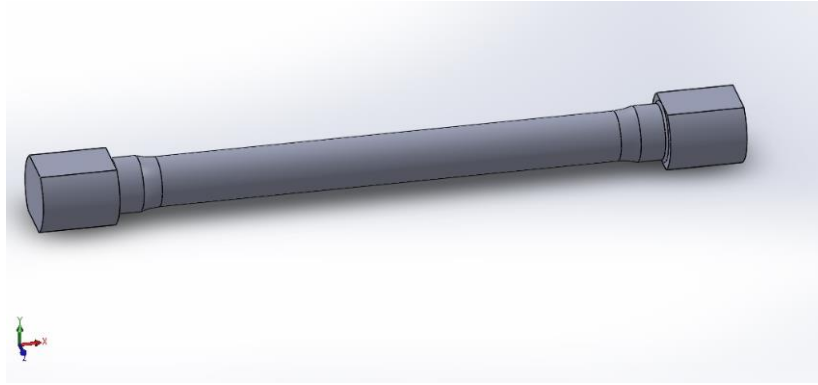


Figura 49. Vista exterior probeta 50% de densidad de relleno en configuración panal de abeja diseñada para ensayo a torsión.

Elaborado por: Echeverría Eddy

#### 4.10.2 Caracterización del Mallado

La discretización de la geometría en elementos muy pequeños es la parte que se llama malla de estudio, es decir, es el conjunto de elementos y nodos donde se realiza el estudio de funcionamiento de las condiciones de servicio y fuerzas varias aplicadas sobre cada elemento.

La creación de la malla requiere una calidad apropiada para que los resultados converjan hacia información apropiada y coherente, así se identifican parámetros para evaluar los elementos creados: Element quality, Aspect ratio, Jacobian ratio, Parallel Deviation, Skewness, Orthogonal quality. En el caso de elementos estructurales es conveniente trabajar con valores de element quality entre 0.9 y 1 para tener resultados fiables en la investigación [2]

Las condiciones de frontera se establecen con base en las condiciones de operación del elemento que se va a estudiar, es decir, soportes, fuerzas, condiciones de conectividad y valores estándares como la gravedad.

En la figura 46 se muestra una sección mallada sobre un eje que permite el estudio del elemento a través de AEF para encontrar información en un cualquier estudio ya sea térmico, dinámico o estático [2].



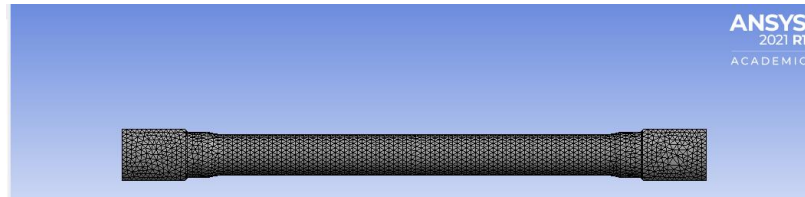


Figura 50. Eje mallado para estudio estructural.

Elaborado por: Echeverría Eddy

### 4.10.3 Simulación ensayo de flexión

Una vez cargado el material y la geometría respectiva se procede a ingresar los valores para encontrar la relación que existe entre la fuerza y el desplazamiento para posteriormente evaluar los valores encontrados en el estudio comparativo.

El ensayo de flexión requiere soportes para simular en comportamiento real del estudio, esta configuración se puede apreciar en la parte izquierda de la parte a) en la figura 47, de igual manera se establece las condiciones de los soportes fijos y la parte de apoyo para realización del ensayo. La parte B es la fuerza aplicada, valor que varía según el estudio a realizar, y D muestra el valor y dirección de la gravedad.

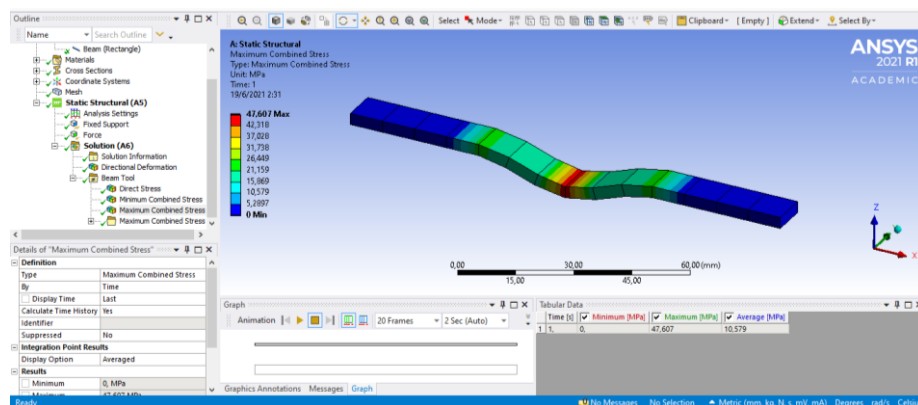


Figura 51. Condiciones carga.

Elaborado por: Echeverría Eddy

En la figura 48 a la derecha se muestra la el mallado del ensayo de flexión para la pieza que posee densidad y patrón de relleno con una métrica “element quality” de valor 0.74941 y 120848 nodos aproximadamente. En el lado izquierdo se aprecia el ensayo en estado sólido encontrando mayor calidad de malla (0.99238) bajo la misma métrica y menor número de nodos (25740), cualidad que se requiere para la convergencia de los resultados esperados.

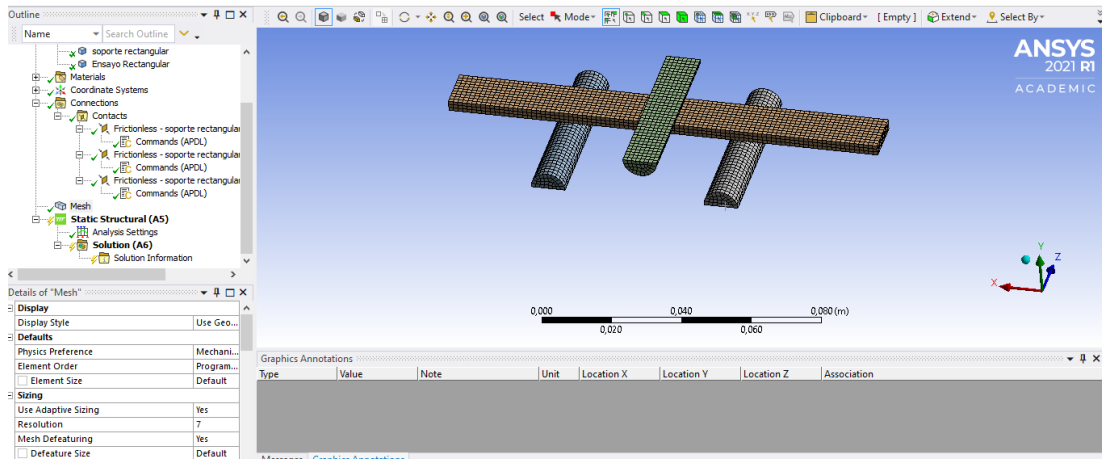


Figura 52. Eje mallado para estudio estructural.

Elaborado por: Echeverría Eddy

#### 4.10.4 Simulación ensayo de torsión.

Los resultados obtenidos son necesarios para ingresar en el estudio de simulación ya que se necesita el momento torsor y la configuración adicional en el software que permite encontrar el ángulo de giro al momento de mostrar resultados.

La simulación de las probetas con densidad y patrón de relleno mostraron ser ineficientes debido a la enorme cantidad de nodos y una mala calidad de malla obtenida con la métrica “element quality” por lo que se optó por trabajar solo con la pieza sólida.

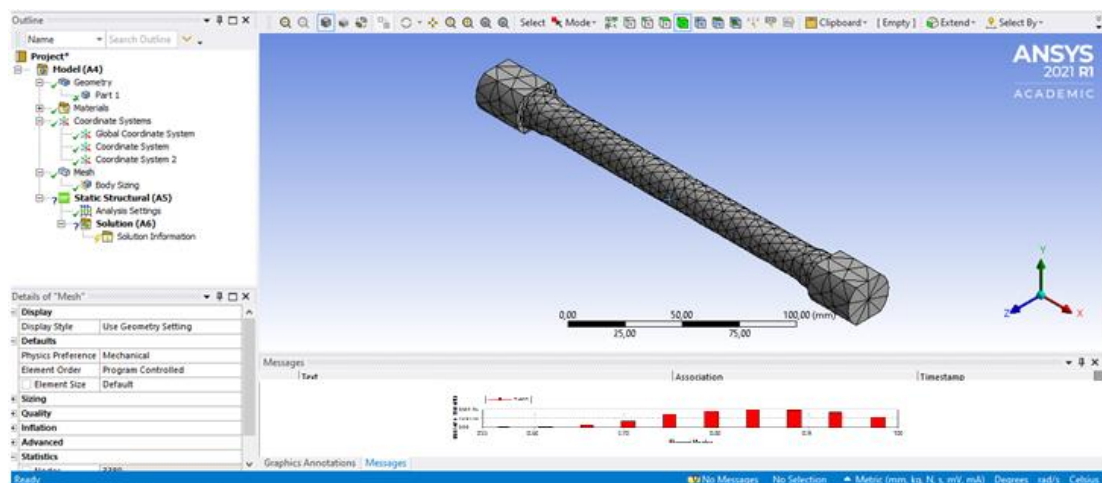


Figura 53. Eje mallado para estudio estructural.

Elaborado por: Echeverría Eddy

En la figura 49 se muestra el mallado de este elemento con una calidad apropiada para este estudio, encontrándose el valor de “element quality” de 0.84824 y 25467 elementos, el refinamiento de la malla solo produce aumento de nodos ya que la calidad se mantiene alrededor de 0.84 debido a esto se opta por trabajar con esta malla por más que no se logre superar una métrica de calidad superior a 0.9 como se estableció.

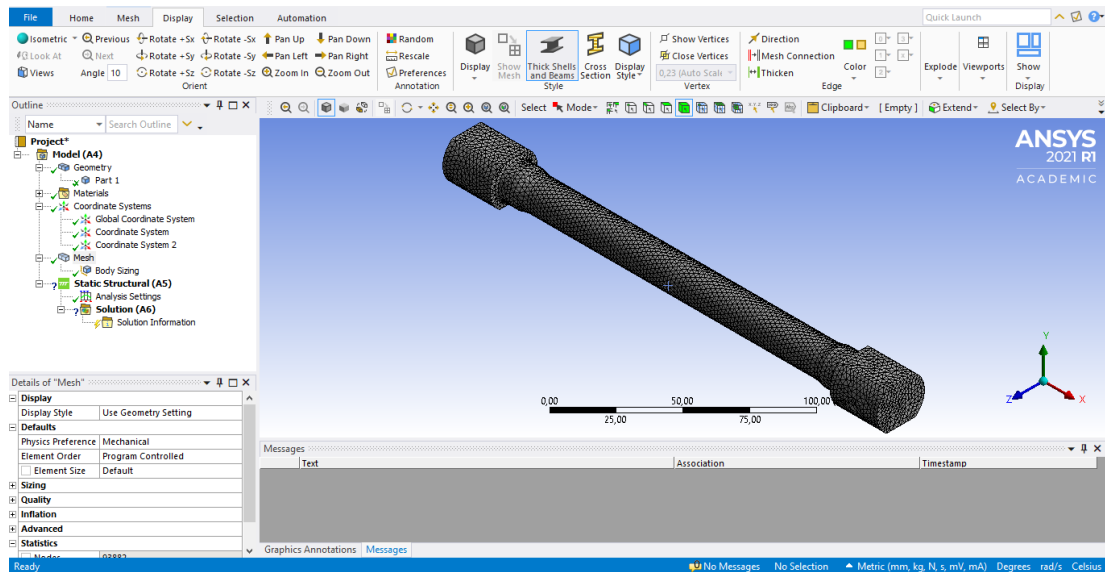


Figura 54. Eje mallado ensayo probeta torsión.

Elaborado por: Echeverría Eddy

## 4.11 Resultados de la simulación

Para el estudio realizado se toma en consideración que el software no presenta imperfecciones de diseño, es decir, el elemento no representa un estado de manufactura específico es por esta razón que se acude a la obtención de los resultados experimentales para cuantificar el valor del proceso de Impresión 3D en el modelo digital y validar los resultados obtenidos.

### 4.x Simulación ensayo de flexión.

La figura 51 muestra los resultados gráficos de la simulación en escala de color de la prueba de flexión de los componentes fabricados con la tecnología de impresión 3D FDM, y la deformación digital representada.

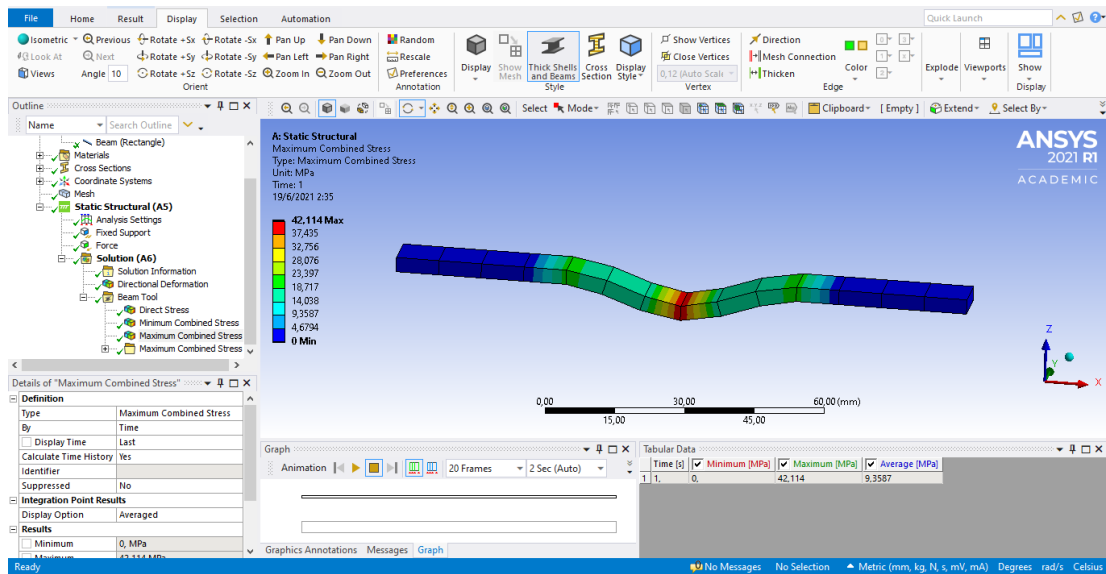


Figura 55. Simulación ensayo flexión.

Elaborado por: Echeverría Eddy

La Tabla 19 muestra los valores proporcionados por la simulación en las diferentes configuraciones creadas por los valores de fuerza aplicada. El método de variación del resultado de la simulación es directamente proporcional al resultado obtenido.

Por lo tanto, cuando se ingresa la fuerza y resistencia del material obtenido, se puede obtener un valor muy cercano al valor encontrado en el experimento. Sin embargo, en el proceso de simulación, la densidad y el patrón de llenado correspondiente se determina y se acerca más a las condiciones del proceso de fabricación

Tabla 19. Resultados de simulación ensayo flexión

Probeta	Carga Máxima (N)	Esfuerzo Máximo de Flexión (MPa)	Deflexión (mm)	Elongación por Flexión (mm/mm)	Módulo de Elasticidad (Mpa)
P1	73.103	46.558	5.9	0.0536	194.963
P2	75.862	48.309	5.2	0.0435	1824.32
P3	73.549	46.842	4.1	0.0346	1924.25
P4	74.213	47.232	5.0	0.0334	1234.23
P5	71.246	45.375	7.5	0.0344	189.423
P6	71.691	45.659	3.1	0.0347	205.219
P7	70.131	25.036	3.6	0.0253	235.111
P8	75.406	48.251	3.2	0.0367	1755.45
P9	72.360	46.085	5.2	0.0532	178.837
P10	75.480	48.072	4.7	0.0434	208.979
Media	73.326	44.540	5.3	0.0346	203513,8

Elaborado por: Echeverría Eddy

#### 4.11.1 Simulación ensayo de torsión.

La figura 55 muestra el resultado gráfico de la probeta de torsión con el código de color de la simulación de la prueba de torsión, así como la deformación de rotación digital que presenta.

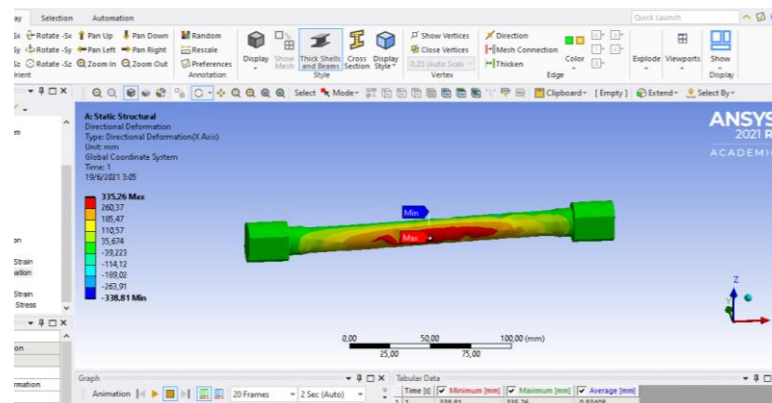


Figura 56. Simulación ensayo flexión.

Elaborado por: Echeverría Eddy

A continuación, la tabla 20 muestra los valores creados por los valores de fuerza aplicados en el estudio de simulación de torsión de la muestra de prueba, los valores proporcionados por la simulación en diferentes configuraciones, las entidades están cuidadosamente diseñadas con geometría de diseño precisa, en comparación con los resultados de fabricación producidos por la tecnología de impresión FDM 3D, los resultados de simulación obtenidos al utilizar la máquina para simular elementos muy pequeños (como el grosor del filamento que deja la boquilla), por lo que la variabilidad de los resultados de simulación producidos es mayor.

Utilizar recursos informáticos adecuados para la investigación estructural, porque la discretización de elementos crea una cuadrícula que contiene elementos extremadamente pequeños, evitando así la convergencia de los resultados

Tabla 20. Resultados simulación ensayo torsión

<b>Probeta</b>	<b>Torque Máximo (N)</b>	<b>Angulo de Giro (rad)</b>	<b>Esfuerzo cortante (MPa)</b>	<b>Deformacion rotacional (mm/mm)</b>	<b>Módulo de Rigidez (Mpa)</b>
PT1	5.406	0.742	7.5246	0.0359	1895.45
PT2	5.862	0.884	8.2556	0.0341	1824.32
PT3	5.549	1.025	7.7471	0.0377	1893.25
PT4	6.103	0.993	8.6368	0.0309	194.963
PT5	5.246	1.192	7.2069	0.0418	209.423
Media	5.323	1.109	7.9616	0.03608	202193

Elaborado por: Echeverría Eddy

## CAPÍTULO V

### ANÁLISIS ESTADÍSTICO

#### 5.1 Descripción de métodos estadísticos

##### 5.1.1 Desviación Estándar Típica

La desviación típica estándar mide el valor de separación que existe entre los datos, se calcula con la siguiente ecuación sugerida por la Norma ASTM D638.

( 11)

$$a = \frac{(\sum^n i = Xi^2) - (N * \bar{x}^2)}{N - 1}$$

##### 5.1.2 Gráficos de Correlación

Los gráficos de correlación son una referencia gráfica que indica si existe alguna relación entre dos o más variables, que no necesariamente es una relación causa – efecto. Se relaciona las características de interés con factores de causa potencial, con la finalidad de localizar las causas potenciales de la variación como respuesta. El beneficio del gráfico de correlación, es que se puede: encontrar la relación, describir el comportamiento entre varios factores y el resultado de interés, que permite tomar decisiones del proceso bajo estudio, con esto mejorar el proceso.

En la imagen 52 y 53 se muestran algunas gráficas de correlación entre dos variables más comunes, como son: correlación lineal positivas cuando r se aproxima a 1 (r=1), correlación lineal negativa si se aproxima a menos 1 (r = -1), correlación nula (r = 0) y la correlación curvilínea, si el valor es muy cercano a cero (r~0).

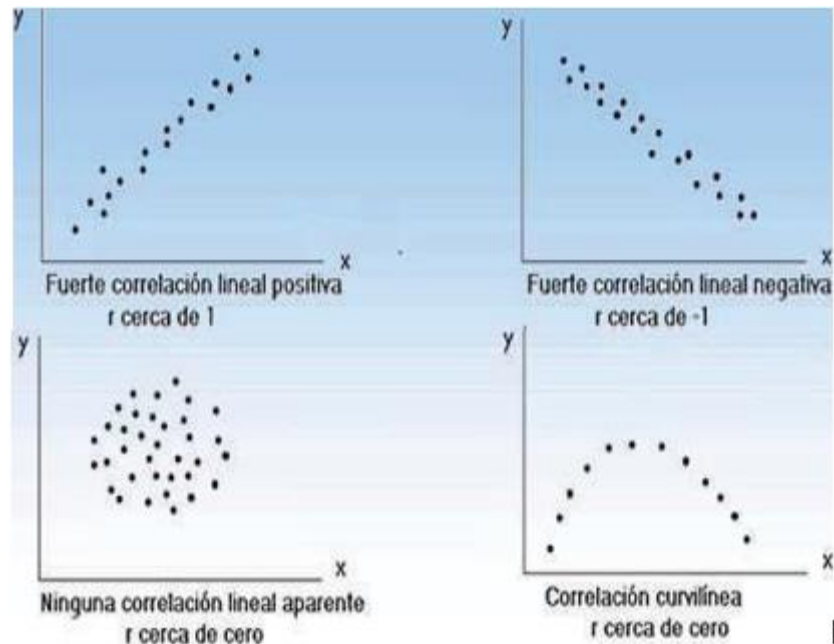


Figura 57. Graficas de correlación.

Elaborado por: Echeverría Eddy.

### 5.1.3 Graficas de Control

Los gráficos de control son empleados en estadística para saber si un proceso se encuentra en una condición estable. Los diagramas de control definen un intervalo de confianza, si el proceso es estadísticamente estable los datos estarán dentro del 99% o 95%. La siguiente figura tiene una línea central (LC), una línea que marca el límite inferior de control (LIC) y otra línea que marca el límite superior de control (LSC), como se ve en el gráfico #10. Los límites de la gráfica de control marcan el intervalo de confianza, en el cual se espera que los datos medidos se encuentren.



Figura 58. Elementos grafica de control.

Elaborado por: Echeverría Eddy.



Otras funciones que tienen los gráficos de control son:

- Diagnóstico del comportamiento de un proceso en el tiempo.
- Indicar si un proceso ha mejorado o no.
- Permite identificar las fuentes de variación de un proceso.
- Es una herramienta para detectar problemas.

#### 5.1.4 Patrones de Inestabilidad en un Gráfico de Control

Los patrones de control permiten identificar si el proceso en estudio se encuentra controlado o equilibrado, para este análisis se hallan determinados ocho patrones de control. Se determina que un proceso se encuentra inestable cuando:

- Se encuentra un punto fuera de los límites de control. (Gráfico, a)
- Si dos o tres puntos consecutivos están dentro de la zona A (entre el límite  $3^a$  y  $2a$ . (Gráfico, b)
- Si cuatro de cinco puntos consecutivos dentro de la zona B. (Gráfico, c, d)
- Ocho puntos consecutivos se hallan en la zona C o más allá. Quince puntos consecutivos en la zona C. (Gráfico, e), Ocho puntos consecutivos en ambos lados de la línea central, pero ninguno en la zona C. (Gráfico, f).
- Seis puntos consecutivos creciendo o decreciendo. (Gráfico, b) [41].

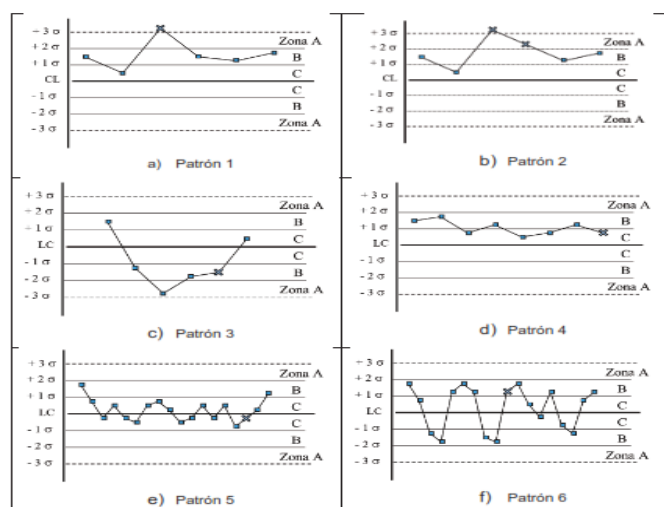


Figura 59. Graficas de correlación.  
Elaborado por: Echeverría Eddy.

## 5.2 Métodos para el estudio estadístico comparativo del ensayo.

### 5.2.1 Método Taguchi

El método Taguchi es una técnica de diseño de experimentos que tiene como objetivo reducir significativamente el número de ensayos mediante el uso de arreglos ortogonales. Además, reduce la influencia de los factores de control, el análisis de varianza se utiliza para determinar los parámetros del proceso que tienen mayor impacto, así como los valores óptimos dentro de un proceso agrupándolos dentro de una matriz estandarizada capaz de seleccionar los datos más representativos.

El método también conocido como Diseño Robusto es aplicado con la finalidad de incrementar la productividad en el proceso de desarrollo de cualquier tipo de elemento para detectar factores influyentes en la variación de efectos de dispersión, si el rendimiento de un proceso o producto no se ve afectado por factores de ruido, es robusto al optimizar las características funcionales del producto obteniendo una mínima sensibilidad de ruido [42].

Taguchi combina estadísticas y métodos de ingeniería capaces de optimizar los procesos de diseño y fabricación para mejorar la calidad y reducir los costos de los productos, El diseño implica el conocimiento del punto donde se encuentra el efecto y la dispersión del mismo donde se relacionan las medidas de estas variables [42].

( 12)

$$\frac{m^2}{a^2}$$

Donde:

$m^2$ : Potencia de la señal

$a^2$ : Potencia del ruido

Los datos recopilados se convierten en tasas de señal / ruido y se analizan mediante análisis de varianza (ANOVA), luego se definen los parámetros óptimos de dichos los factores. En la que el método Taguchi, optimiza los resultados al determinar el nivel

óptimo de factores de control que reduzcan el impacto de ruido generando una estructura estadística completamente perfeccionada.

### 5.2.2 Diseño mediante arreglo ortogonal

Dentro del análisis Taguchi toma el arreglo ortogonal como punto de partida para el diseño de experimentos fundamentados en la toma de muestras por niveles de factores según la ecuación X, donde se obtendrá los grados de libertad en el sistema a fin de encontrar el menos número de experimentos válidos para realizar el experimento donde el arreglo será mayor o igual al número total de grados libertad [43].

( 13)

*Mínima cantidad experimentos = DOF +1*

### 5.2.3 Factores y niveles influyentes

El método probabilístico experimental conlleva un gran número de factores tomados en cuenta en el proceso.

- Factor de control donde los parámetros de diseño pueden variar conforme el fabricante lo desee mas no el consumidor
- Factor de ruido se producen durante el ensayo pueden afectar directa o indirectamente a la producción como por ejemplo factores relacionados al espacio, tiempo, ambiente, maquinaria, proveedores, etc.
- Factor de señal varía en función a la respuesta objetivo se presentan problemas estáticos donde la respuesta es una sola siendo su factor de señal constante por otro lado problemas dinámicos que presentan una respuesta objetivo variable en la que su factor al igual fluctúa.
- Factor de escalada relaciona funcionalmente el factor de señal y la calidad característica variando la media de la calidad [43].

### 5.2.4 Función objetivo

El método Taguchi tiene como objetivo minimizar el factor de ruido seleccionando el nivel del factor corresponde a la relación de señal/ruido máximo. El tipo de tasa que se utiliza depende directamente de la calidad de las funciones que desea obtener siendo estas señales pequeña, nominal y grande.

Función objetivo más pequeño los valores a tomar ocupan el rango 0 a  $\infty$  donde la característica es continua no negativa expresado por la ecuación [42].

( 14)

$$n = -10 \log \left[ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Y_i^2 \right]$$

Donde:

$n$ : Numero de replicas.

Nominal cumple condición que el valor objetivo no puede ser 0 ni infinito con la característica continua no continua no negativa representada por la ecuación [42]. Seguido por la validación de factores de ajuste igualados a la media objetivo.

( 15)

$$n = 10 \log \left[ \frac{Y^2}{S^2} \right]$$

Donde:

$$Y = \sum_{i=1}^n \frac{Y_i}{n}$$

$$S^2 = \sum_{i=1}^n \frac{(Y_i - Y)^2}{n} = \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i^2 - nY^2)}{n}$$

Función objetivo grande toma valores rango 0 a  $\infty$ , calidad continua no negativa capta calidades características representado por la ecuación 14 [42].

### 5.2.5 Método ANOVA

Análisis de varianza (ANOVA), o también conocido como análisis de la variación media, incluye dividir la variación total en un conjunto de datos "componentes". se atribuyendo a una causa o fuente de variación identificable, además, el "componente" representa el cambio debido a factores no controlados y errores aleatorios asociados con la medición [43].

El análisis de varianza evalúa la importancia de uno o más factores comparando los valores medios de las variables de respuesta en diferentes niveles de factores. Las expresiones básicas del ANOVA se describen en las ecuaciones.

( 16)

$$SS_{Total} = SS_{Factores} + SS_{Error}$$

$$Total, df = \text{grados de libertad de los factores} + \text{grado de libertad error}$$

$$V = \frac{S_A}{f}$$

Estos términos se combinan y se utilizan para crear una tabla de análisis de varianza encargada de analizar el porcentaje de impacto a fin de determinar los mejores parámetros para el proceso.

Tabla 21. Análisis de varianza (ANOVA).

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Media de los cuadrados / varianza	Fo
Factor	SS <sub>F</sub>	K - 1	V <sub>F</sub> = SS <sub>F</sub> / K - 1	V <sub>F</sub> / V <sub>e</sub>
Error	SS <sub>e</sub>	N - K	V <sub>e</sub> = SS <sub>e</sub> / N - K	
Total	SS <sub>Total</sub>	N - 1		

Elaborado por: Echeverría Eddy

Donde

N = Número total de observaciones

SS<sub>F</sub> = Suma de los cuadrados del factor

K = Numero de niveles del factor

$SS_F$  = Suma de los cuadrados del error

$F_o$  = Calculo del valor F

$V_F$  = varianza del factor

$V_e$  = Varianza del error

El ANOVA proporciona un análisis de resultados optimo al captar un amplio margen de factores de control donde sus resultados pueden ser estadísticamente comprobados. [42].

### 5.2.6 Fortalezas de enfoques estadísticos

Tanto el diseño experimental como el método Taguchi pueden optimizar procesos con entradas controlables y salidas medibles. Ambos métodos pueden usar múltiples entradas para afectar la salida que se va a medir. La diferencia fundamental entre ellos radica en la forma en que cada método maneja la interacción entre factores de entrada. En el diseño experimental clásico, aunque se prueban todas las combinaciones de niveles de entrada o sus puntuaciones simétricas, el método Taguchi solo trata una pequeña parte de las posibles combinaciones de factores de entrada, pero este método permite calcular los efectos de todas las entradas. El resultado del factor.

Tabla 22. Comparación diseño experimental y método Taguchi [44]

<b>COMPARACIÓN DE FORTALEZAS Y DEBILIDADES DE DOS ENFOQUES</b>		
	<b>Diseño experimental clásico</b>	<b>Métodos de Taguchi</b>
<b>Fortalezas</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Se pueden estudiar todas las interacciones entre factores el mismo tiempo.</li><li>• No se necesitan conocimientos profundos sobre el funcionamiento de los procesos estudiados.</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• La filosofía de Taguchi en su conjunto es muy recomendable.</li><li>• El concepto de función de perdida es útil e innovador.</li></ul>
<b>Debilidades</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>• No se pueden aprovechar ni usar los conocimientos previos sobre el proceso.</li><li>• No hay forma de hacer más eficientes los procesos pensando como interactuar realmente sus entradas.</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Lleva a diseños experimentales complejos.</li><li>• Promueve a veces experimentos ineficientes.</li><li>• Se presentan algunos problemas con los métodos de análisis de datos.</li></ul>

Tabla 23. Diseño análisis de datos Taguchi [44]

<p><b>Métodos de Taguchi</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Suponen que los usuarios de estos métodos poseen cierto entendimiento del proceso estudiado y de las interacciones subyacentes entre las entradas.</li> <li>• Fueron inventados por ingenieros para ingenieros.</li> <li>• Según Taguchi, algunas variables están bajo control, y otras no (factores de ruido). Unos de los primeros pasos en los métodos de Taguchi, es el uso de conocimientos previos del proceso para identificar los factores controlables y de ruido significativos.</li> <li>• Taguchi, recomienda una ratio señal-ruido para representar la robustez, (aunque un simple análisis de la varianza o el desvío estándar bastaría).</li> <li>• En contraste con el diseño de experimentos clásico, Taguchi sugiere una ronda final de experimentos de confirmación.</li> <li>• Mientras que el diseño de experimentos clásico puede ignorar o no considerar explícitamente los factores de ruido, el diseño Taguchi los usa para contrastar la robustez del sistema, así como para contrastar las entradas óptimas.</li> </ul>
--

Tabla 24. Diseño experimental [44]

<p><b>Diseño de experimentos</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Supone que los usuarios no tienen un conocimiento profundo de los mecanismos que gobiernan el proceso investigado.</li> <li>• Fue inventado por ingenieros para ingenieros.</li> <li>• Presupone que todos los ingresos deben interactuar entre sí, Por esto, cuando no se tiene definido de antemano que interacciones son las relevantes, el diseño experimental es la opción que conviene elegir.</li> <li>• En el diseño de experimentos, no solo se estudian las interacciones, sino que ellas se estudian al mismo tiempo, en una misma ronda de pruebas.</li> </ul>
--

Tabla 25. Análisis ANOVA flexión modelo practico y teórico factor Carga Máxima.

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	6301250	1	6301250	2,660643967	0,1223831	4,493998478
Dentro de los grupos	37893082	16	2368317,6			
<b>Total</b>	<b>44194332</b>	<b>17</b>				

Tabla de análisis de varianza (ANOVA) flexión.

Elaborado por: Echeverría Eddy.

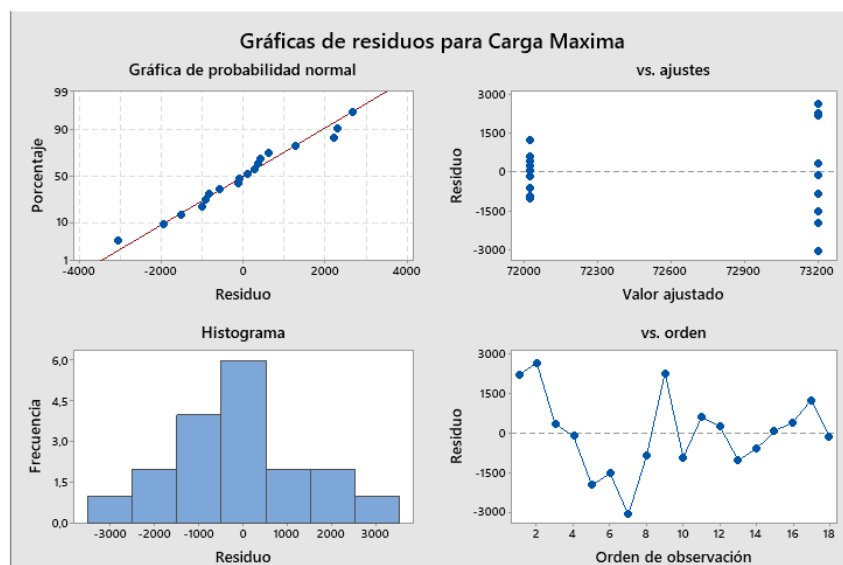


Figura 60. Graficas de correlación Método Taguchi software minitab.

Elaborado por: Echeverría Eddy



Tabla 26. Análisis ANOVA torsión modelo practico teórico factor Torque Máximo.

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	145684,9	1	145684,9	1,25240675	0,2955666	5,317655072
Dentro de los grupos	930591,6	8	116323,95			
Total	1076276,5	9				

Elaborado por: Echeverría Eddy

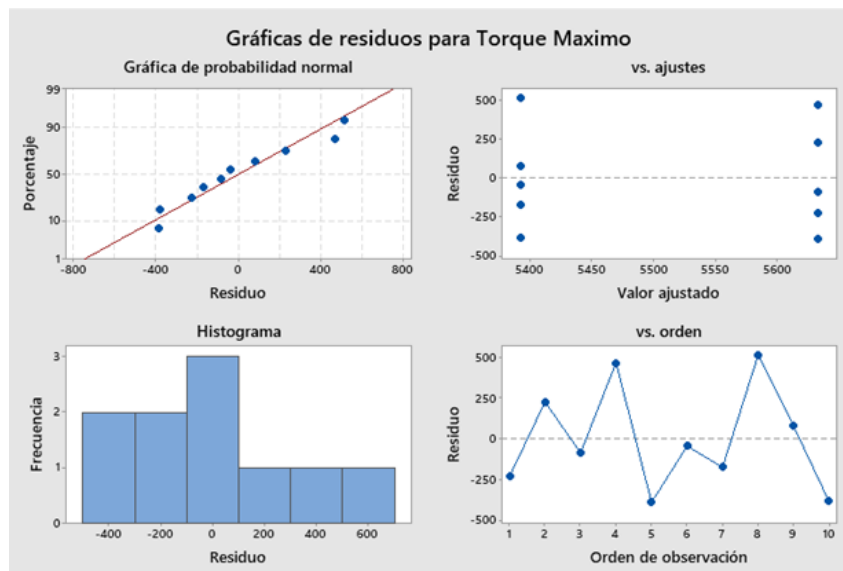


Figura 61. Graficas de correlación Método Taguchi software minitab.

Elaborado por: Echeverría Eddy

Tabla 27. Análisis ANOVA flexión modelo practico teórico factor Esfuerzo  
Máximo.

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	18629408	1	18629408	0,67462977	0,42351241	4,49399848
Dentro de los grupos	441828308	16	27614269,3			
Total	460457716	17				

Elaborado por: Echeverría Eddy

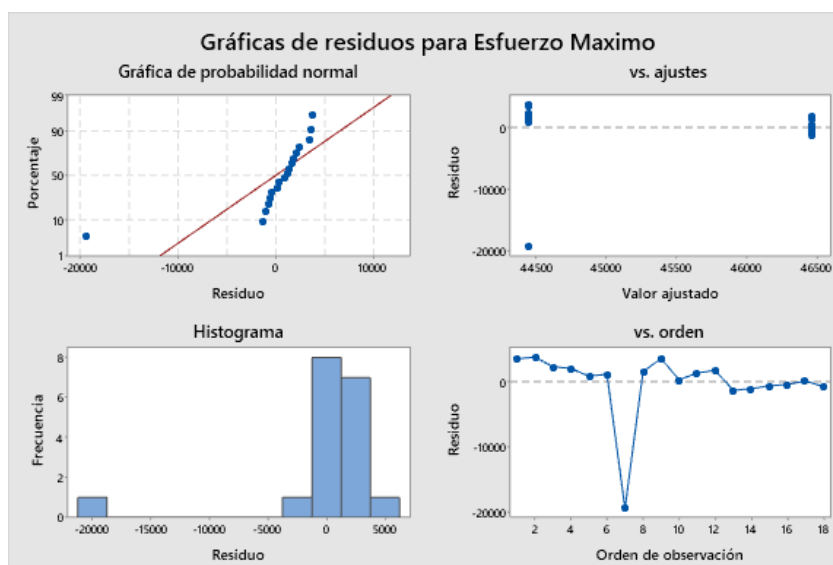


Figura 62. Graficas de correlación Método Taguchi software minitab.

Elaborado por: Echeverría Eddy

Tabla 28. Análisis ANOVA torsión modelo practico teórico factor Esfuerzo Cortante.

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	3,50464	1	3,50464	6,6813589	0,03237215	5,31765507
Dentro de los grupos	4,19632	8	0,52454			
<b>Total</b>	<b>7,70096</b>	<b>9</b>				

Elaborado por: Echeverría Eddy

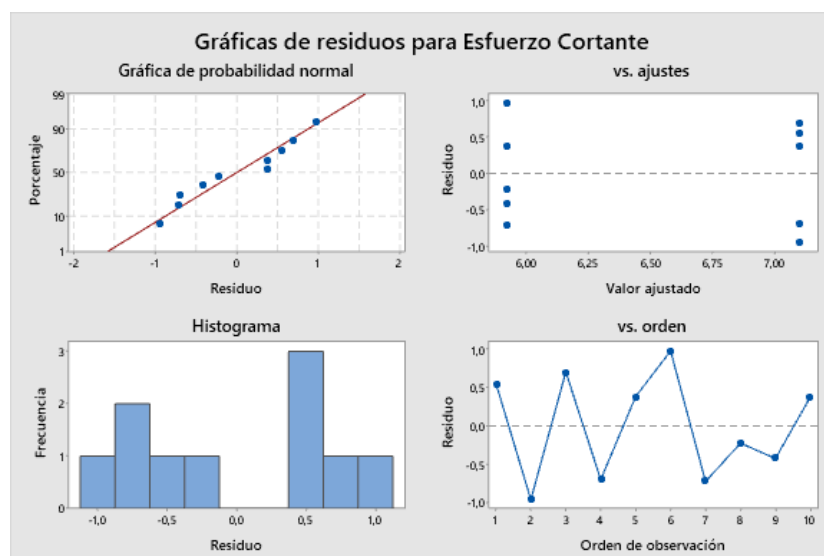


Figura 63. Graficas de correlación Método Taguchi software minitab.

Elaborado por: Echeverría Eddy

Tabla 29. Análisis ANOVA flexión modelo practico teórico factor Modulo de Elasticidad.

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	530,40245	1	530,40245	0,0119031	0,9144788	4,4939985
Dentro de los grupos	712962,48	16	44560,155			
Total	713492,89	17				

Elaborado por: Echeverría Eddy

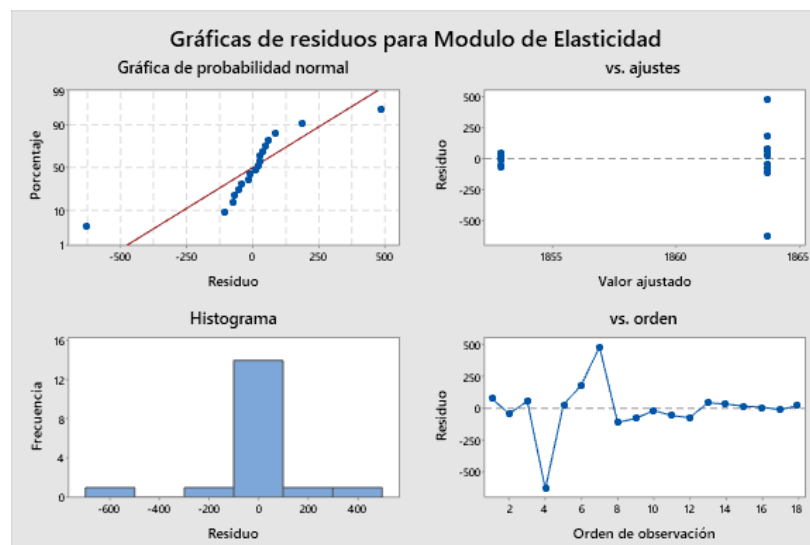


Figura 64. Graficas de correlación Método Taguchi software minitab.

Elaborado por: Echeverría Eddy

Tabla 30. Análisis ANOVA torsión modelo practico teórico factor Modulo de Rigidez.

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	22847,444	1	22847,444	2,03207055	0,19183854	5,31765507
Dentro de los grupos	89947,4441	8	11243,4305			
Total	112794,888	9				

Elaborado por: Echeverría Eddy

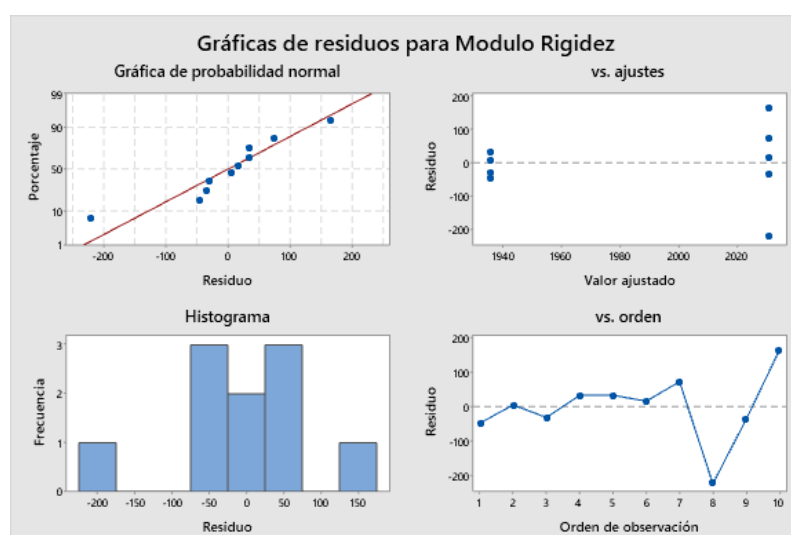


Figura 65. Graficas de correlación Método Taguchi software minitab.

Elaborado por: Echeverría Eddy

## CAPÍTULO VI

### VALIDACIÓN DE RESULTADOS

#### 6.1 Resultados obtenidos en base al ensayo

Para determinar los cambios existentes en los ensayos de flexión y torsión, se compararon los valores promedio de los valores experimentales y teóricos de las propiedades mecánicas mencionadas anteriormente.

Tabla 31. Análisis 1 Flexión

Densidad de relleno [%]	Experimental		Teórico	
	Esfuerzo	Deformación	Esfuerzo	Deformación
	Máximo	unitaria	Máximo	unitaria
	[MPa]	[mm/mm]	[MPa]	[mm/mm]
50	43,992	0,0345	44,540	0,0346

Elaborado por: Echeverría Eddy

Tabla 32. Análisis 2 Torsión

Densidad de relleno [%]	Experimental		Teórico	
	Esfuerzo	Deformación	Esfuerzo	Deformación
	Cortante	unitaria	Cortante	unitaria
	[MPa]	[mm/mm]	[MPa]	[mm/mm]
50	7,90	0,0435	7,9616	0,0367

Elaborado por: Echeverría Eddy

## 6.2 Comparativa modelo teórico y práctico

Una vez determinada la media de las propiedades mecánicas al 50 % de densidad de relleno, para establecer la diferencia existente entre las propiedades del ensayo a flexión y torsión experimental y teórica respectivamente, se establece, calcular el margen de error existente generado por la parte experimental y teórica, por medio de la Ecuación 17.

( 17)

$$\% \text{ error} = \frac{\text{Valor experimental} - \text{valor teórico}}{\text{Valor experimental}} * 100$$

Tabla 33. Análisis de errores Esfuerzo Máximo y Deformación Unitaria al 50 %, experimental-teórico modelo flexión.

Densidad de relleno	Experimental		Teórico		Error	Error
	Esfuerzo Máximo [%]	Deformacion Unitaria [mm/mm]	Esfuerzo Máximo [MPa]	Deformacion Unitaria [mm/mm]	Esfuerzo Máximo [%]	Deformacion Unitaria [%]
50	43,992	0,0346	44,540	0,0388	1,2456	12,138

Elaborado por: Echeverría Eddy

El resultado para las probetas ensayadas a flexión en porcentaje de error, determinado para el 50 % de densidad de relleno en configuración panal de abeja tomando en cuenta para valores experimentales 43,992 (MPa), 0.0346 (mm/mm) y valores teóricos 44,540 (MPa), 0,0388 (mm/mm) de esfuerzo máximo y deformación unitaria respectivamente fue: esfuerzo máximo del 1,2456 %. Lo que implica, una diferencia porcentual global de menos del 5 % de las propiedades mecánicas obtenidas a partir de la simulación con respecto a las experimentales, por otro lado, la deformación unitaria llega a alcanzar un porcentaje de error del 12.138 % tomando en cuenta a gran escala que su variación se encuentra dentro de los parámetros tolerables.

Tabla 34. Análisis de errores Esfuerzo Cortante y Deformación Unitaria al 50 %, experimental-teórico modelo torsión.

Densidad de relleno	Experimental		Teórico		Error	Error
	Esfuerzo	Deformacion	Esfuerzo	Deformacion	Esfuerzo	Deformacion
	Cortante	Unitaria	Cortante	Unitaria	Cortante	Unitaria
	[MPa]	[mm/mm]	[MPa]	[mm/mm]	[%]	[%]
50	7,90	0,0434	7.9616	0,0360	0,7737	17,050

Elaborado por: Echeverría Eddy

Las probetas ensayadas a torsión con el 50 % de densidad de relleno en configuración panal de abeja, a partir de la ecuación, para valores experimentales 7,90 (MPa), 0.0434 (mm/mm) y valores teóricos 7,9616 (MPa), 0,0435 (mm/mm) de esfuerzo cortante y deformación unitaria respectivamente se calculó el porcentaje de error en el esfuerzo cortante siendo este un error del 0,7737 % para las dos densidades, por otro lado, en la deformación unitaria fue del 17,050 %.

En referencia a que el porcentaje de error a la deformación unitaria en ambas practicas es similar al ser producto del mismo material, se procedió a detallar las probetas con el objetivo de estructurar el comportamiento de dicha propiedad. Las tablas 35 y 36, comprenden la deformación unitaria obtenida experimentalmente y teóricamente para los ensayos realizados en el proyecto, donde existe una variación del 0,28 % entre ambos ensayos.



Tabla 35. Comparación deformación unitaria al 50 %,  
experimental-teórico ensayo flexión

Probeta	Deformación	Deformación
	unitaria	unitaria
	experimental	teórica
	[mm/mm]	[mm/mm]
1	0,0350	0,0536
2	0,0347	0,0435
3	0,0349	0,0346
4	0,0343	0,0334
5	0,0344	0,0344
6	0,0345	0,0347
7	0,0348	0,0253
8	0,0345	0,0367
9	0,0339	0,0532
Media	0,0346	0,0388

Elaborado por: Echeverría Eddy

Tabla 36. Comparación deformación unitaria al 50 %, experimental-teórico  
ensayo torsión

Probeta	Deformación	Deformación
	unitaria	unitaria
	experimental	teórica
	[mm/mm]	[mm/mm]
1	0,0343	0,0359
2	0,0445	0,0341
3	0,0523	0,0377
4	0,0461	0,0309
5	0,0402	0,0418
Media	0,04348	0,03608

Elaborado por: Echeverría Eddy

Las Tablas, comprenden la propiedad mecánica de deformación para los ensayos de flexión y torsión, donde existe similitud y se toleran ciertas discrepancias en los resultados entre los ensayos experimental y teórico.

### 6.3 Análisis en función a la viabilidad de implementación de la tecnología respecto a otras más tradicionales

En las figuras 65 y 66, se muestra el estado de las probetas de flexión y torsión respectivamente con densidad de relleno del 50 %. En donde, la parte más crítica a deformarse se posiciona en los puntos de mayor estrés en las caras de contacto, de las probetas. De la misma forma, las secciones de color rojo tienden a ser más propensa a la falla, siendo así la sección difuminada en color azul la de menor tensión y estrés la cual será la menos propensa a sufrir daños.

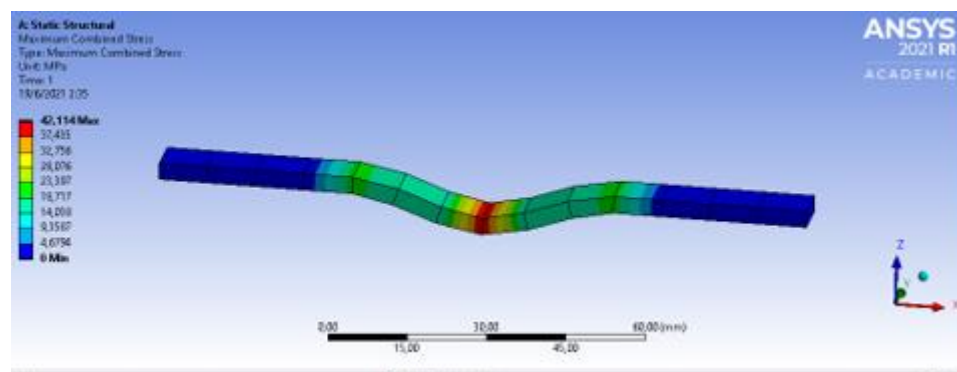


Figura 66. Modelo flexión.

Elaborado por: Echeverría Eddy

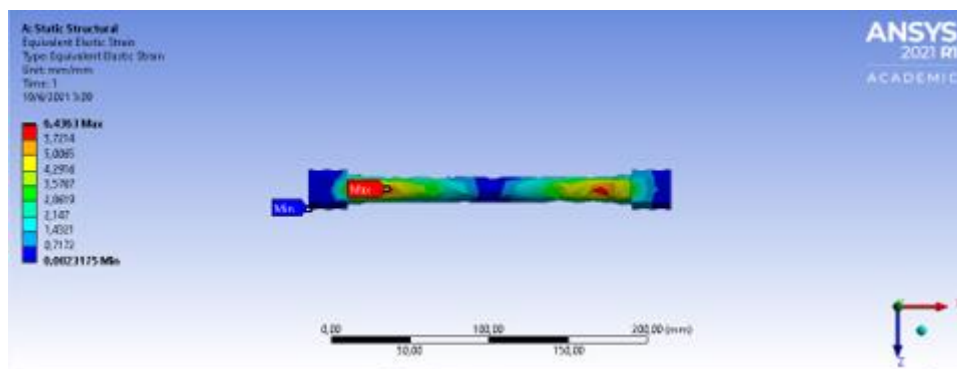


Figura 67. Modelo torsión.

Elaborado por: Echeverría Eddy

#### 6.4 Campo y mercado que abarca la tecnología en impresión 3D y sus principales beneficios respecto a otras.

Para el desarrollo del presente proyecto técnico se establece el precio de la materia prima, herramientas, equipos y mano de obra. A través de dos categorías, denominadas costos directos e indirectos.

Tabla 37. Análisis 5 Costos Beneficio

Cantidad	Descripción	Proceso	Horas	Costo hora [USD]	Costo total [USD]
2	Impresión 3D	Fabricación de bloques de 6 probetas para flexión	2	4	16
2	Impresión 3D	Fabricación de bloques de 6 probetas para torsión	6	10	120
1	Máquina universal	Ensayos: flexión y torsión	15	12	180
2	Probetas	Modelado CAD	1	20	40
1	Simulación	Simulación y programación	6	30	180
				Total	536

Elaborado por: Echeverría Eddy

## **CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

### **CONCLUSIONES**

Los parámetros establecidos según las normas ASTM D638-14 y ASTM D695-15 con los que se realizó el proceso de fabricación corresponden a la temperatura de extrusión (210 ° C), velocidad de impresión (30 mm/s) y espesor de capa (0,2 mm). Para muestras con un patrón exterior recto y una densidad de relleno del 50% en una configuración de panal de abeja.

La implementación de la tecnología en impresión 3D dentro de la industria ecuatoriana se incrementa de manera significativa, llegando a ser una herramienta capaz de reducir tiempo y costo en procesos productivos dada su adaptabilidad en función a la necesidad de cada diseñador y costos reducidos del material de aporte.

En base a las normativas ASTM D790, ASTM D143 para los ensayos de flexión y torsión respectivamente se estructuró y normalizó el dimensionamiento de cada probeta a ensayar tomando a consideración dentro del ensayo a torsión que la probeta debe ser ajustada y dimensionada en función a la máquina encargada de realizar la prueba.

Se determinó que el análisis se debe llevar a cabo solo bajo ciertos criterios dado que las propiedades determinadas por la empresa que suministra el material de análisis en el ensayo SAIS 3D se generan de probetas sólidas sometidas a ensayos destructivos normalizados a diferencia del presente ensayo el cual fue aplicado bajo una especificación y configuración determinada.

Dentro de probetas con densidad de relleno al 50 % en configuración panal de abeja, el esfuerzo máximo de flexión obtenido experimentalmente es de 48,309 MPa, mientras que dentro del ensayo a torsión se obtuvo un esfuerzo cortante máximo de 8,46 MPa, esto confirma que la configuración en relleno de impresión es la más óptima para mantener las propiedades y que la densidad de relleno es proporcional a la resistencia del material.

La deformación unitaria a flexión para las probetas del 50 % es de 0,0346 mm/mm y para las de torsión al 50 % de 0,0435 mm/mm, respectivamente. Es decir, hay un incremento del 5% entre las propiedades mecánicas establecidas en la simulación por configuración estructural al momento del diseño en la densidad de relleno.

Según el análisis estadístico ANOVA Taguchi realizado en el software estadístico especializado Minitab 19 se corrobora que el estudio y análisis experimental propuesto cumple con los estándares adecuados para ser válido en función de que cada factor hipotético cumple rangos tolerables, los mismos que afirman la correcta ejecución de los ensayos.

## **RECOMENDACIONES**

Investigar las pruebas estandarizadas que realiza cada empresa sobre sus materiales e investigación de sistemas de calibración estandarizados para impresoras 3D para mantener la geometría del patrón de relleno durante todo el proceso de impresión con el fin de establecer y mejorar los resultados.

Estudiar el comportamiento de las propiedades mecánicas del PLA y sus diferentes aleaciones a fin de reducir el porcentaje de relleno y mejorar las propiedades mecánicas.

Estandarizar el ensayo fabricado mediante impresión 3D a fin de caracterizar las propiedades de tracción y compresión de diferentes polímeros, cambiando el porcentaje de llenado y la densidad, la dirección de impresión y la velocidad de impresión.

En el proceso de fabricación de cada muestra es necesario conocer las propiedades físicas y químicas de los materiales de relleno, pues son elementos plásticos y generarán ciertos gases tóxicos, por lo que se recomienda realizar el proceso de impresión en una zona con circulación aérea.

## LISTA DE REFERENCIA

- [1] E. Mendoza, «Uso de impresión 3d bicomponente para la fabricación de una empuñadura a medida,» Valladolid,, 2018.
- [2] H. Titusunta y G. Yanchapaxi, «Determinación de la capacidad de resistencia a la flexión y torsión del material ácido poliláctico (pla) mediante impresión 3D,» Quito, 2019.
- [3] G. Pacheco, «Análisis de tracción de probetas impresas en 3d, mediante deposición de hilo fundido de PLA, ABS y PLA/MLO,» Cuenca, 2019.
- [4] Co-funded by the Erasmus, «3DP,» 19 Agosto 218. [En línea]. Available: [https://3d-p.eu/wp-content/uploads/2018/08/IO3\\_3DP-courseware\\_ES.pdf](https://3d-p.eu/wp-content/uploads/2018/08/IO3_3DP-courseware_ES.pdf).
- [5] V. Cepeda y Anilú Rubio, «Análisis de las propiedades fisicoquímicas de materiales poliméricos para re-uso en impresiones 3D,» *Revista de divulgación científica "Ciencia Cierta"*, nº Nº. 55, pp. 1-13, Septiembre 2018.
- [6] V. Molina, «Caracterización de materiales termoplásticos de ABS y PLA semi rígido impresos en 3d con cinco mallados internos diferentes,» Quito, 2016.
- [7] G. Reinoso, «Determinación del límite de resistencia a la tracción y compresión del material ácido poliláctico manufacturado mediante impresión 3d.,» Quito, 2020.
- [8] S. Farah y R. Langer, «Physical and mechanical properties of PLA, and their functions in widespread applications — A comprehensive review,» *Revista Advanced Drug Delivery Reviews*, vol. Vol. 23, nº Nº. 12, pp. 367-392, Junio 2019.
- [9] S. Troya, «Estudio para la síntesis de ácido poliláctico (PLA), a partir de ácido láctico mediante el método de policondensación con catalizador y sin catalizador.,» Latacunga, 2018.
- [10] V. Molina, «Caracterización de materiales termoplásticos de ABS y PLA Semi - Rígido impresos en 3D con cinco mallados internos diferentes,» Quito, 2016.
- [11] L. Serna, A. Rodríguez y F. Albán, «Ácido Poliláctico (PLA): Propiedades y Aplicaciones,» *Revista Bacteriología*, vol. Vol. 5, nº Nº. 1, pp. 23-76, Octubre 2003.
- [12] W. Tellez, «Estudio para el modelado e impresión 3D de autopartes,» Guayaquil, 2018.
- [13] D. Askeland y W. Wright, «Ciencia e ingeniería de materiales,» *Revista CENGAGE*, vol. Vol. 7, nº Nº. 3, pp. 1-40, 4 Julio 2019.
- [14] F. Beer y R. Johnston, *Mecánica de materiales*, México: McGrawH. Educación, 2010.
- [15] B. G. Barriga Machado y M. A. Santillan Tasigchana, «Diseño y construcción de una máquina de torsión para ensayos de polímeros.,» *Escuela Superior Politécnica de Chimborazo*, vol. 1, pp. 1-174, 2020.

- [16] P. Ganán y A. Mullo, «Rediseño de una máquina de ensayos de torsión existente en los laboratorios de la universidad técnica de cotopaxi para determinar el comportamiento mecánico de los materiales,» Latacunga, 2019.
- [17] F. Bordignon, y A. Iglesias,, «Diseño e impresión de objetos 3D : una guía de apoyo a escuelas,» *Red de Bibliotecas Virtuales de CLACSO*, vol. Vol. 3, pp. 20-215, 2018.
- [18] A. Trevejo y D. Fernández, «Estereolitografía: Conceptos básicos,» *Rev. Estomatol Herediana*, vol. Vol. 23, nº Nº. 2, pp. 96-100, 2013.
- [19] B. Martínez y E. Llanes, «Tecnologías de impresión 3D: evaluaciones de FDM y Polyjet en la fabricación de autopartes de automóviles,» *Revista Enfoque UTE*, vol. Vol. 10, nº Nº. 3, pp. 13-29, 2019.
- [20] E. Absalón, «Sistema de posicionamiento aplicado a la técnica de impresión 3D modelado por deposición fundida,» *Rev. Investig. Desarro. Innov*, vol. Vol. 3, nº Nº. 1, pp. 1-8, 06 Diciembre 2012.
- [21] E. Rivera y G. Chavira, «Análisis correlacional de la calidad de app's para conteo de calorías,» *Revista de Negocios & PyMES*, vol. Vol. 3, nº Nº. 7, pp. 15-59, Martzo 2017.
- [22] B. Alvarado y W. Gómez, «Estudio para el modelado e impresión 3D de autopartes,» Guayaquil, 2018.
- [23] E. Pérez, «Uso de impresión 3d bicomponente para la fabricacion de una empuñadura a medida,» Valladolid, 2018.
- [24] J. Osejos, «Caracterizaci''on de materiales termoplasticos de ABS y PLA Semi-Rigido impresos en 3D con cinco mallados internos diferentes,» Quito, 2017.
- [25] M. Rodríguez, «Estudio sobre la optimización de los parámetros de fabricación en una impresora 3d con tecnología FDM,» Barcelona, 2017.
- [26] K. Alvarez y R. Lagos, «Influencia del porcentaje de relleno en la resistencia mecánica en impresión 3D,por medio del método de Modelado por Deposición Fundida (FDM),» *Revista chilena de ingeniería*, vol. Vol. 24, nº Nº. 12, pp. 17-24, Abril 2016.
- [27] A. Relaño, «Estudio comparativo de piezas de ABS y PLA procesadas mediante modelado por deposición fundida.,» Madrid, 2013.
- [28] W. Liu y J. Zhou, «Fabrication of PLA Filaments and its Printable Performance,» *Revista Materials Science and Engineering*, vol. Vol. 3, nº Nº. 2, pp. 2-7, Julio 2017.
- [29] B. Akhoundi y A. Behraves, «Efecto del patrón de relleno en las propiedades mecánicas de tracción y flexión de los productos impresos en 3D FDM,» *Revista de Ciencia*, vol. Vol. 16, nº Nº. 9, pp. 23-84, 2019.
- [30] H. Venegas, «Determinación de la capacidad de resistencia a la flexión y torsión del material ácido poliláctico (pla) mediante impresión 3D,» Quito, 2019.

- [31] Y. García, «Diseño de un producto industrial mediante técnicas de impresión 3d y nuevos materiales,» Valencia, 2019.
- [32] P. Scoz, «lingüística experimental: contornos de uma reflexão,» Curitiba, 2021.
- [33] Á. Muñoz, «Impresion 3d: pruebas de resistencia de materiales de acuerdo a norma ASTM D638-10,» *Revista Newsletter*, pp. 2-5, 2015.
- [34] J. Claver, «Análisis normativo y evaluación geométrica de probetas para la caracterización mecánica de piezas obtenidas por fabricación aditiva mediante FDM,» *Revista UNED*, vol. Vol. 4, pp. 1-12, Septiembre 2018.
- [35] S. Valle, «Diseño y construcción del utillaje para el método estándar de prueba para propiedades de compresión de polímeros (ASTM D695:2015) en el centro de fomento productivo metalmecánico carroceros,» Ambato, 2020.
- [36] D. Armas y C. Narváez, «Caracterización de propiedades mecánicas de las fibras de banano de la corteza y el cuerpo del tallo,» *Universidad de las Fuerzas Armadas*, vol. Vol. 20, nº Nº. 1, pp. 1-11, Abril 2015.
- [37] P. Paca, «Rediseño de una máquina de ensayos de torsión existente en los laboratorios de la universidad técnica de Cotopaxi,» Latacunga, 2019.
- [38] R. Calderón y F. Morillo, «Análisis de la influencia de los tratamientos térmicos (recocido y revenido), en las propiedades mecánicas de la aleación de aluminio 7075-t651 mediante ensayos de tracción”,» Quito, 2019.
- [39] G. Ñacata y E. Cherres, «Análisis de la variación de la resistencia a la torsión del acero aisi/sae 4140 tratado térmicamente por temple a 830°C – 860°C y revenido a 500°C,» Quito, 2019.
- [40] C. Juárez, «Uso y aplicación de la tecnología de impresión y bioimpresión 3D en medicina,» *Revista de la Facultad de Medicina*, vol. Vol. 61, nº Nº. 6, pp. 16-75, Diciembre 2018.
- [41] A. Gansino, «Análisis de la resistencia mecánica en pernos de anclaje hasta 1/2 pulgada de diámetro, utilizados en estructuras metálicas,» Quito, 2021.
- [42] A. Stanziola, «De engranajes CNC utilizando el método taguchi y análisis de la de engranajes CNC utilizando el método taguchi y análisis de la varianza (ANOVA),» Mexico, 2016.
- [43] A. Mendoza, «Parametrización predictiva del acabado superficial en el fresado convexo mediante la aplicación de los métodos estadísticos taguchi - anova en el acero m201,» Qutio, 2020.
- [44] E. Arias, «Estudio comparativo entre los enfoques de diseño experimental robusto de Taguchi y tradicional en presencia de interacciones de control por control,» *Revista Ingeniería, investigación y tecnología*, vol. Vol. 16, nº Nº. 1, pp. 52-163, Marzo 2015.



- [45] M. Ojeda, «Preparación y caracterización de nanocompuestos en base PLA,» *Revista de mecánica industrial*, vol. Vol. 34, nº N.º. 16, pp. 56-153, 4 Julio 2019.

## ANEXOS

### Anexo 1. Ficha técnica de máquina TESTRESOURCES.

TESTRESOURCES		
SYSTEM CAPACITY RATING		
STATIC FORCE	33,750 lb	(150 kN)
SPEED MIN.	0,01 in/min	(0,25 mm/min)
SPEED MAX.	12,0 in/min	(300,0 mm/min)
STROKE LENGTH	49 in	(1220 mm)

### Anexo 2. Instructivo de máquina para ensayo torsión.

INSTRUCTIVO

EQUIPO: MAQUINA DE TORSION  
CODIGO: MM – 24  
MANUAL: MMM – 24

MARCA: AVERY  
MODELO: 6609 CHG

**CARACTERISTICAS TECNICAS:**

VOLTAJE: 220 [V]                      REFRIGERANTE: N/A  
FASES: 3                                  TIPO DE MOTOR: 952 CT  
CICLOS: 50 [Hz]                      POTENCIA MOTOR: ½ [HP]  
PESO: 700 [Kg]                      VELOCIDAD MAXIMA MOTOR: 420 [rpm]  
CAPACIDAD MAXIMA: 1500 [Nm]                      COMBUSTIBLES: N/A

**NORMAS PARA SU FUNCIONAMIENTO**

Para su funcionamiento regirse estrictamente al manual MMM – 24.

**PRECAUCIONES**

No sobrepasar el 90% de la capacidad máxima de ensayo.

**NOMBRE DE ENSAYOS**

Ensayo de torsión.

**TIEMPO DE DURACION**

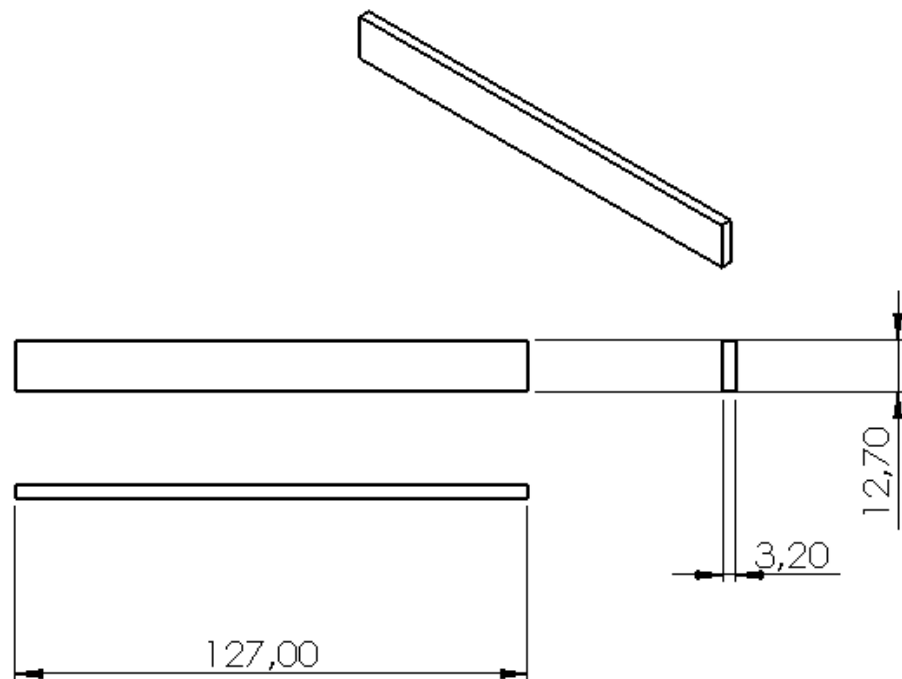
De acuerdo a las condiciones del ensayo.

**PRESTACION DE SERVICIOS**

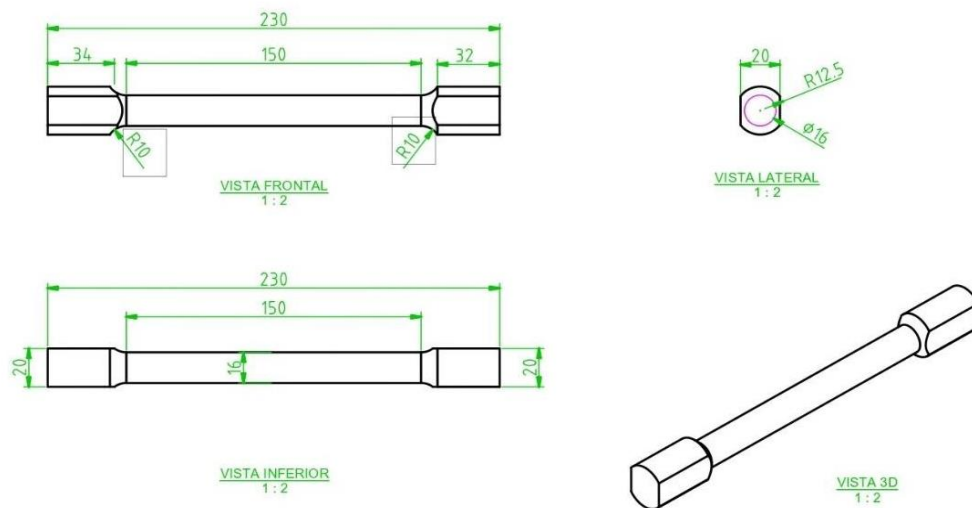
Torsión en barras cilíndricas – RM1524T

**MM**

### Anexo 3. Plano de la probeta, ensayo de flexión.



### Anexo 4. Plano de Ensayo de torsión



## Anexo 5. Imágenes de ensayo de flexión.



Figura 68. Máquina TESTRESOURCES para ensayo de Tracción.



Figura 69. Placa técnica de la capacidad de la máquina.

## Anexo 6. Imágenes de ensayo de torsión



Figura 70. Máquina AVERY para ensayo de torsión



Figura 71. Placa técnica de la máquina AVERY para ensayo de torsión